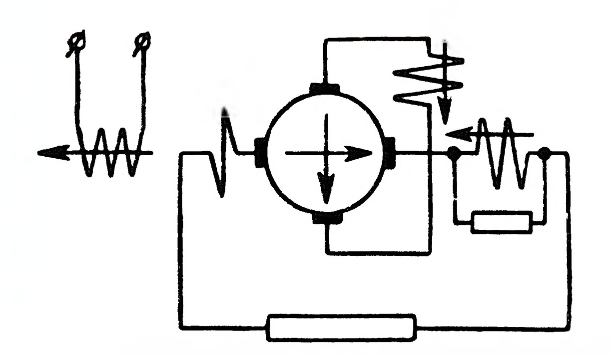
библиотека

по

АВТОМАТИКЕ

В. И. Радин

Электромашинные усилители



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ

Выпуск 58

В. И. РАДИН

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5(4)-3

В книге описаны устройство, принцип действия и основы теории различных типов электромашинных усилителей, применяемых в отечественной и зарубежной технике. При этом наибольшее внимание уделяется ЭМУ поперечного поля, которые нашли наиболее широкое применение. Приводятся методы настройки и испытаний ЭМУ поперечного поля, а также некоторые простейшие схемы автоматизированных электроприводов с использованием ЭМУ.

Книга предназначена для широкого круга инженеров, техников и специалистов, работающих по созданию и эксплуатации автоматизированных электроприводов и их элементов. Книга может быть также использована студентами при изучении курсов электрических машин и электропривода.

6П2.15+6П2.12 *Радин Владимир Исакович*

Р 15 **Электромашинные усилители,** М.—Л., Госэнергоиздат, 1962, 80 с. с черт. („Библиотека по автоматике", вып. 58)

6П2 15+6П2.12

Редактор *Н. А. Кузнецов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 31/III 1962 г. Подписано к печати 20/VI 1962 г.

Т-07703 Бумага 84×108 1/32 4,1 печ. л. Уч.-изд. л. 5,0

Тираж 32 000 экз. Цена 25 коп. Зак. 2198

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Основные понятия и требования

Важнейшим элементом систем регулирования является усилитель.

Усилителями принято называть такие устройства, посредством которых можно с помощью малых мощностей управлять сравнительно большими мощностями.

В системах автоматизированного электропривода широкое распространение получили электронные, электромашинные, магнитные и полупроводниковые усилители.

Три вида усилителей — электронные, магнитные и полупроводниковые являются статическими усилителями; электромашинные — вращающимися усилителями.

Электромашинные усилители впервые были введены в системы автоматического регулирования в 1937 г. и с тех пор получили широкое распространение в автоматизированном электроприводе.

Электромашинные усилители (ЭМУ) обычно представляют собой коллекторную машину постоянного тока. По системе возбуждения электромашинные усилители принято делить на ЭМУ продольного поля и ЭМУ поперечного поля. В первых основной рабочий поток возбуждения действует по продольной оси машины (вдоль полюсов), во вторых — по поперечной оси.

В системах регулирования на вход ЭМУ (обмотки управления) подается сигнал, который в машине усиливается за счет потребления энергии от приводного двигателя, а к выходу ЭМУ подключается электродвигатель, приводящий во вращение исполнительный механизм, или обмотка возбуждения другой, значительно более мощной машины.

Естественно, что чем большее усиление происходит в машине, тем более легкую и маломощную аппаратуру можно применить в цепи управления ЭМУ. Поэтому первое основное требование, предъявляемое к ЭМУ, это обеспечение максимального усиления в машине, характеризующегося коэффициентом усиления. Коэффициент усиления ЭМУ есть отношение мощности на выходе ЭМУ к мощности на входе:

$$k_у = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}. \qquad (1)$$

Иногда различают еще коэффициенты усиления по току и напряжению:

$$k_{yi} = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}; \quad (2)$$

$$k_{yu} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \quad (3)$$

Легко видеть, что

$$k_y = k_{yi} k_{yu}. \quad (4)$$

Для увеличения коэффициента усиления в ЭМУ часто применяют две или три ступени усиления. Поэтому по числу ступеней усиления ЭМУ разделяются на одноступенчатые, двухступенчатые и трехступенчатые. Если k_{y1}, k_{y2}, k_{y3}— коэффициенты усиления каждой ступени, то общий коэффициент такого усилителя будет:

$$k_y = k_{y1} k_{y2} k_{y3}. \quad (5)$$

В современных ЭМУ величина коэффициента усиления бывает от 1 000 до 100 000.

Вторым основным требованием, предъявляемым к ЭМУ, является быстродействие. Чем быстрее будет реагировать ЭМУ на изменение входного сигнала, тем точнее и лучше будет работать система автоматического регулирования.

Быстродействие ЭМУ в основном обусловливается электромагнитной инерцией магнитного поля возбуждения выходной ступени ЭМУ, поскольку эта ступень наиболее мощная и требует наибольшей затраты электромагнитной энергии.

Постоянная времени цепи, как известно, определяется как

$$T = \frac{L}{R}, \quad (6)$$

где L — индуктивность;
R — активное сопротивление цепи.

В ЭМУ постоянная времени выходной ступени составляет примерно 0,02—0,2.

Для оценки различных ЭМУ при их сравнении часто вводится понятие добротности, определяемой как отношение коэффициента усиления к постоянной времени,

$$k_д = \frac{k_y}{T}. \quad (7)$$

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к ЭМУ, являются также надежность в работе и стабильность характеристик. Поскольку ЭМУ нашли широкое применение в автоматизированном электроприводе, то от надежности их работы часто зависит бесперебойная работа важнейших механизмов. Нарушение в работе ЭМУ может привести к значительным экономическим потерям. Главной причиной того, что за последнее время в системах автоматического регу-

лирования ЭМУ начали вытесняться статическими усилителями (магнитными), является бо́льшая надежность последних в работе. Поэтому важнейшей задачей проектировщиков и изготовителей ЭМУ является обеспечение их надежности.

Требования, предъявляемые ко всем машинам и аппаратам,— обеспечение минимального веса и габаритов, особенно важны для ЭМУ, так как они находят широкое применение в самолетных, корабельных и других передвижных системах регулирования.

В следящих системах автоматического регулирования ЭМУ работают в основном в переходных режимах, в процессе которых возможны большие кратковременные перегрузки по току и напряжению. Поэтому к ЭМУ предъявляется также требование обеспечения большой перегрузочной способности.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭМУ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

1. НЕЗАВИСИМЫЙ ЭМУ

Простейшим электромашинным усилителем является обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 1).

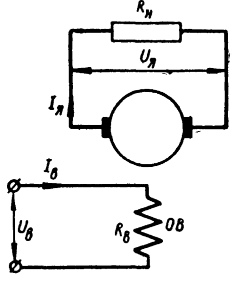


Рис. 1. Принципиальная схема независимого ЭМУ.

Коэффициент усиления такого генератора будет:

$$k_у = \frac{U_я I_я}{I_в^2 R_в}. \qquad (8)$$

Уравнение (8) можно преобразовать, выразив коэффициент усиления через параметры машины. Для этого введем для коэффициентов, учитывающих: $k_E = \frac{E}{U_я}$ — отношение э. д. с. E к напряжению $U_я$ на якоре генератора; $k_ж$ — коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи, и $\sigma_в$ — магнитное рассеяние обмотки возбуждения, и выразим э. д. с. E через конструктивные параметры машины, а магнитный поток возбуждения — через намагничивающую силу и проводимость.

В результате простых преобразований получим:

$$k_у = \frac{k}{k_E k_ж \sigma_в} n \frac{A}{B_\delta} \cdot \frac{D_я}{\delta k_\delta} T_в, \qquad (9)$$

где k — числовой коэффициент;
n — скорость вращения якоря;
A — линейная нагрузка якоря;
B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре;
$D_я$ — диаметр якоря;
k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий зубчатое строение якоря и статора.

Как видно из уравнения (9), коэффициент усиления прямо пропорционален постоянной времени $T_в$ и, следовательно, с увеличением коэффициента усиления ухудшается быстродействие ЭМУ.

Коэффициент добротности:

$$k_{д} = \frac{k_{у}}{T_{в}} = \frac{k}{k_{E} k_{ж} \sigma} \, n \, \frac{A}{B_{\delta}} \cdot \frac{D_{я}}{\delta k_{\delta}} \, . \qquad (10)$$

Из анализа уравнения (10) видно, что коэффициент добротности ЭМУ увеличивается с увеличением скорости вращения, линейной нагрузки, диаметра якоря и уменьшается с увеличением воздушного зазора, индукции в нем и насыщением.

Таким образом, для получения хороших свойств ЭМУ (высокой добротности) необходимо иметь высокоскоростную ненасыщенную малоиспользованную в магнитном отношении машину сравнительно больших габаритов.

Обычный серийный генератор постоянного тока с независимым возбуждением не обладает перечисленными свойствами и поэтому имеет низкие показатели как усилитель. Кроме того, в массивном ярме статора, обычно применяющемся в машинах постоянного тока, в переходном процессе наводятся вихревые токи, ухудшающие быстродействие машины. Большое остаточное напряжение также отрицательно влияет на работу системы регулирования.

Поэтому в качестве усилителя целесообразно использовать высокооборотный ненасыщенный генератор с шихтованным ярмом статора и минимальным воздушным зазором. Такой генератор с независимым возбуждением принято называть «независимым ЭМУ».

Рис. 2. Принципиальная схема независимого ЭМУ с тремя обмотками управления.

Для систем автоматического регулирования также требуется, чтобы ЭМУ был снабжен несколькими обмотками возбуждения или, как их принято называть, обмотками управления (рис. 2). В обмотку управления часто для уменьшения постоянной времени цепи управления включают активное сопротивление $R_{д}$:

$$T'_{у} = \frac{L_{у}}{R_{у} + R_{д}} = \frac{L_{у}}{R_{у} \; k_{R}} = \frac{T_{у}}{k_{R}} \, , \qquad (11)$$

где $k_{R} = \dfrac{R_{у} + R_{д}}{R_{у}}$,

$L_{у}$ — индуктивность обмотки управления;
$R_{у}$ — активное сопротивление обмотки управления;
$R_{д}$ — добавочное сопротивление.

Все обмотки управления в ЭМУ обычно располагаются в одних и тех же пазах статора, и, как показывают экспериментальные исследования, между обмотками существует практически почти полная магнитная связь. Поэтому при наличии нескольких обмоток управления, имеющих замкнутые контуры, постоянная времени ка-

кой-либо цепи управления будет суммой постоянных времени всех обмоток. Для ЭМУ, показанного на рис. 2,

$$T_1 = T_{y1} + T_{y2} + T_{y3}. \quad (12)$$

Переходный процесс нарастания напряжения холостого хода ненасыщенного независимого ЭМУ при подаче импульса напряжения на обмотку управления можно описать уравнениями:

$$U_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}; \quad (13)$$

$$E_2 = k_u U_1, \quad (14)$$

где U_1 — напряжение, приложенное к цепи управления;
i_1 — ток цепи управления;
r_1 — активное сопротивление;
L_1 — индуктивное сопротивление цепи управления;
E_2 — э. д. с. на выходе ЭМУ;
k_u — коэффициент усиления по напряжению.

В операторной форме

$$U_1 = i_1 R_1 (1 + pT_1) \quad (15)$$

или с учетом (14)

$$E_2 = \frac{k_u U_1}{1 + pT_1}, \quad (16)$$

где $T_1 = \frac{L_1}{r_1}$ — постоянная времени цепи управления.

Как известно, решение уравнения (16) имеет следующий вид:

$$E_2 = U_1 k_u \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right). \quad (17)$$

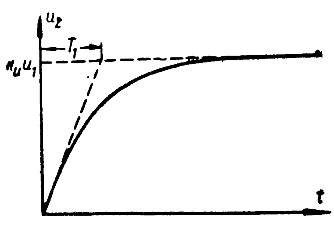


Рис. 3. Кривая нарастания напряжения холостого хода независимого ЭМУ.

Таким образом, нарастание напряжения на выходе ЭМУ происходит, как это видно из уравнения (17), по экспоненте (рис. 3) с постоянной времени T_1.

Отсутствие насыщения в ЭМУ позволяет применять в системах регулирования форсировку возбуждения и при этом значительную перегрузку по напряжению ЭМУ. Это может значительно улучшить быстродействие системы автоматического регулирования.

В независимом ЭМУ не удается получить высокого коэффициента усиления, а поэтому они редко применяются в системах регулирования.

2. ЭМУ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

Для увеличения коэффициента усиления можно добавить обмотку самовозбуждения. Такой ЭМУ с самовозбуждением в зарубежной технике получил название «рототрол». Конструктивно он не отличается от независимого ЭМУ.

Обмотка самовозбуждения может быть включена параллельно (рис. 4,*а*) или последовательно (рис. 4,*б*) с обмоткой якоря машины.

Такое включение обмоток возбуждения широко применяется в машинах постоянного тока: параллельное включение — в шунтовых, последовательное включение — в сериесных. Однако в этих машинах обмотки возбуждения настраиваются таким образом, чтобы самовозбуждение машины обеспечивалось от остаточного напряжения.

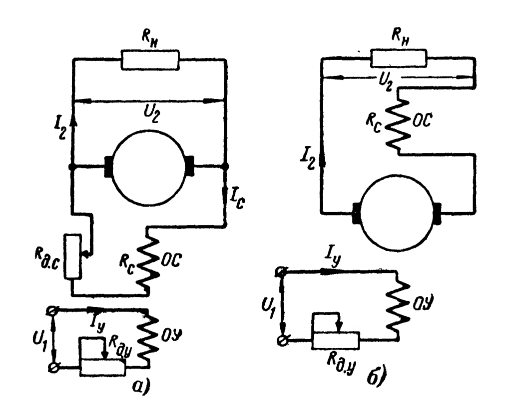


Рис. 4. Принципиальные схемы ЭМУ с самовозбуждением.

а — ЭМУ с параллельным самовозбуждением; *б* — ЭМУ с последовательным самовозбуждением.

В отличие от этого в ЭМУ обмотка самовозбуждения настраивается так, чтобы машина без сигнала в независимой обмотке управления (рис. 5) не самовозбуждалась, но была близка к порогу самовозбуждения.

На рис. 5 показана характеристика холостого хода ЭМУ и прямая *1* падения напряжения в цепи самовозбуждения $I_c R_c$ при токе в независимой цепи управления $I_у = 0$ (R_c — сопротивление цепи самовозбуждения, I_c — ток в этой цепи). Если эта прямая не пересекает характеристику холостого хода, то ЭМУ не самовозбуждается. При прохождении тока по независимой обмотке управления на щетках ЭМУ появится напряжение e_1, по цепи самовозбуждения потечет ток, и ЭМУ возбудится до напряжения, показанного на рис. 5 точкой пересечения характеристики холостого хода с прямой *1'*, выражающей падение напряжения в приведенной цепи само-

возбуждения $I_c R_c'$ при токе в независимой цепи управления I_y', где $R_c' = R_c \frac{w_y}{w_c}$ — сопротивление в цепи самовозбуждения, приведенное к обмотке управления. На рис. 5 эта точка обозначена через a.

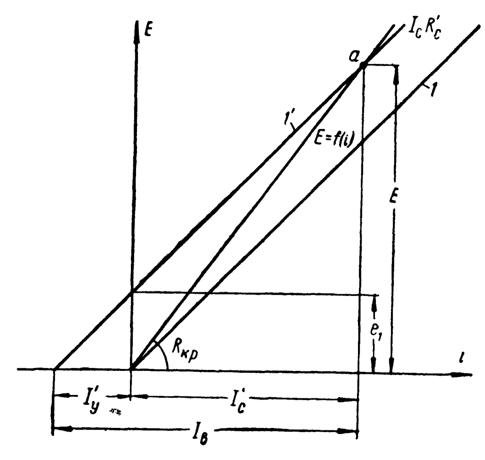


Рис. 5. Характеристика холостого хода ЭМУ с самовозбуждением.

Суммарный ток возбуждения ЭМУ будет:

$$I_в = I_y' + I_c, \tag{18}$$

где $I_y' = \frac{w_y}{w_c} I_y$ — ток управления, приведенный к обмотке самовозбуждения;

w_y — число витков обмотки управления;

w_c — число витков обмотки самовозбуждения.

Для повышения добротности ЭМУ с самовозбуждением обычно не насыщен.

Анализируя рис. 5, можно из простых геометрических соотношений получить следующее значение э. д. с. холостого хода ЭМУ с самовозбуждением:

$$E = k_1 \frac{R_c}{R_c - k_1} i_y, \tag{19}$$

где $k_1 = \frac{E}{i_в}$ — коэффициент пропорциональности э. д. с. по току возбуждения, он будет также выражать критическое сопротивление ЭМУ (порог самовозбуждения), определяемое наклоном прямолинейной части характеристики холостого хода ($k_1 = R_{кр}$).

При сопротивлении цепи самовозбуждения, равном $R_{кр}$ ($R_c = R_{кр}$), э. д. с. стремится к бесконечности.

Аналогичные соотношения можно получить и для ЭМУ с последовательным самовозбуждением.

Сравнивая коэффициенты усиления независимого ЭМУ и ЭМУ с самовозбуждением и пренебрегая падением напряжения в якоре, можно получить:

$$k_{\text{у с}} \approx m k_{\text{у}}, \tag{20}$$

где

$$m = \frac{R_{\text{с}}}{R_{\text{у}} - k_1}. \tag{21}$$

Коэффициент m представляет собой также отношение полной намагничивающей силы возбуждения к намагничивающей силе обмотки управления.

Таким образом, коэффицент усиления ЭМУ с самовозбуждением может быть значительно больше, чем у независимого ЭМУ.

Рассмотрим переходной процесс нарастания напряжения холостого хода ЭМУ с параллельным самовозбуждением (см. рис. 4,*а*) при подаче сигнала на обмотку управления.

Считая, что по обмоткам управления и самовозбуждения течет ток $i_{\text{в}} = i_{\text{у}} + i_{\text{с}}$, можно записать уравнения переходного процесса в операторной форме при отсутствии рассеяния между этими обмотками:

$$U_1 = r_{\text{у}} i_{\text{у}} + L_{\text{у}} p i_{\text{в}}; \tag{22}$$

$$E = k_u U_1 = r_{\text{с}} i_{\text{с}} + L_{\text{с}} p i_{\text{в}}. \tag{23}$$

Решая совместно эти уравнения, получим:

$$E = U_1 k_u \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{э}}}}\right), \tag{24}$$

где

$$T_{\text{э}} = m\,(T_{\text{у}} + T_{\text{с}}); \tag{25}$$

здесь $T_{\text{у}} = \frac{L_{\text{у}}}{r_{\text{у}}}$; $T_{\text{с}} = \frac{L_{\text{с}}}{r_{\text{с}}}$ — постоянные времени цепей управления и самовозбуждения.

Примерно такие же соотношения получаются и при анализе ЭМУ с последовательным самовозбуждением (см. рис. 4,*б*).

Сравнивая постоянную времени ЭМУ с самовозбуждением с независимым ЭМУ, легко видеть, что в первом случае быстродействие машины значительно хуже, чем во втором. Поэтому ЭМУ с самовозбуждением применяются в случаях, когда не требуется высокое быстродействие.

3. ДВУХМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Коэффициент усиления ЭМУ можно увеличить также включением каскада двух машин с независимым возбуждением последовательно, так чтобы одна из них была возбудителем другой (рис. 6):

$$k_{\text{у}} = k_{\text{у}1} k_{\text{у}2}, \tag{26}$$

где $k_{\text{у}1}$ — коэффициент усиления первой машины;

$k_{\text{у}2}$ — коэффициент усиления второй машины.

Переходной процесс нарастания напряжения холостого хода на выходе второй машины при подаче сигнала на обмотку возбуждения первой машины и при отсутствии насыщения можно описать системой уравнений:

$$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}; \tag{27}$$

$$E_2 = k_1 i_1 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}; \tag{28}$$

$$E_3 = k_2 i_2 = k_u U_1, \tag{29}$$

где k_1, k_2 — коэффициенты, определяющие параметры машин (тангенс угла наклона прямолинейной части характеристик холостого хода первой и второй машины), или в операторной форме:

$$U_1 = i_1 (R_1 + L_1 p); \tag{30}$$

$$E_2 = k_1 i_1 = i_2 (R_2 + L_2 p). \tag{31}$$

Решение уравнения

$$E_3 = \frac{k_u U_1}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)} \tag{32}$$

будет:

$$E_3 = k_u U_1 \left[1 + \frac{1}{T_2 - T_1} \left(T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \right], \tag{33}$$

где $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ — постоянные времени цепей возбуждения первой и второй машины.

Процесс нарастания напряжения апериодический, по так называемой двойной экспоненте (рис. 7).

Часто для удобства расчетов двойную экспоненту заменяют обычной с постоянной времени $T_1 + T_2$ (пунктирная кривая на рис. 7).

Быстродействие двухмашинного усилителя в основном определяется постоянной времени цепи, включающей обмотку возбуждения наиболее мощной выходной ступени, поскольку она обладает наибольшей индуктивностью. Действительно, именно с этой обмоткой сцеплен основной поток машины.

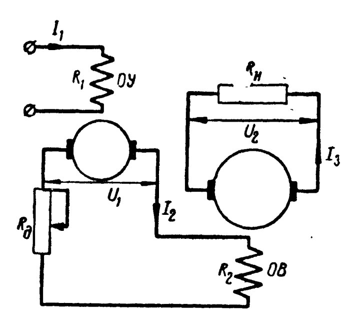


Рис. 6. Принципиальная схема двухмашинного ЭМУ.

Поскольку каждая ступень усиления представляет собой отдельную машину, параметры каждого генератора могут быть выбраны наиболее рациональными независимо один от другого.

Оба генератора можно разместить в одном корпусе, причем

габариты такого однокорпусного двухмашинного агрегата будут определяться генератором выходной ступени, имеющим значительно бо́льшую мощность, чем генератор первой ступени.

Генератор выходной ступени можно спроектировать с высоким использованием активных материалов, при этом он будет сравнительно небольших габаритов, но его свойства как усилителя будут невысокими.

Генератор первой ступени можно спроектировать на том же диаметре, что и генератор второй ступени. При этом в генераторе пер-

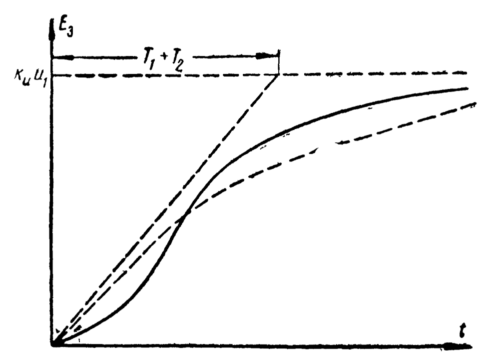


Рис. 7. Кривая нарастания напряжения холостого хода двухмашинного ЭМУ.

вой ступени будет очень низким использование активных материалов, а следовательно, как было показано выше, он будет иметь высокие показатели как усилитель. Общий коэффициент усиления такого двухмашинного усилителя может быть достаточно высоким (1 000—10 000).

Такой ЭМУ выпускается западногерманской фирмой Сименс — Шуккертверке под названием «рапидин».

В рапидине для устранения вредного влияния вихревых токов и уменьшения гистерезиса полюсы и ярма статоров изготавливаются шихтованными из электротехнической стали. Генератор второй ступени снабжен компенсационной обмоткой, улучшающей усилительные свойства второй ступени и позволяющей получить требуемый наклон внешней характеристики. Для улучшения условий коммутации в генераторе выходной ступени устанавливаются дополнительные полюсы.

Число полюсов каждой ступени, параметры обмоток и магнитных систем можно выбрать такими, чтобы обеспечить хорошие свойства ЭМУ. Так как выходная ступень рапидина хорошо использована, то он не допускает больших форсировок напряжения.

4. ДВУХКОЛЛЕКТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Двухколлекторный ЭМУ представляет собой электрическую машину постоянного тока, объединяющую в одну машину два генератора, один из которых имеет вдвое больше пар полюсов, чем другой.

На якоре машины в одних и тех же пазах располагаются две обмотки: одна, имеющая p пар полюсов, вторая—$2\ p$ пар полюсов. Каждая обмотка соединяется со своим коллектором, которые устанавливаются по обеим сторонам стали якоря.

Обычно для упрощения конструкции ЭМУ изготавливается в двух — четырехполюсном исполнении. При этом на статоре устанавливаются четыре шихтованных полюса. Катушки обмотки управления двухполюсной системы располагаются на тех же полюсах, что и катушки возбуждения четырехполюсной системы, но соединяются последовательно таким образом, что образуют двухполюсную систему (две соседние катушки соединены так, чтобы иметь одну и ту же полярность, рис. 9) В двухполюсной обмотке якоря не должна наводиться э. д. с. от четырехполюсного магнитного потока, поскольку секции двухполюсной обмотки якоря охватывают два полюса различной полярности четырехполюсной магнитной системы.

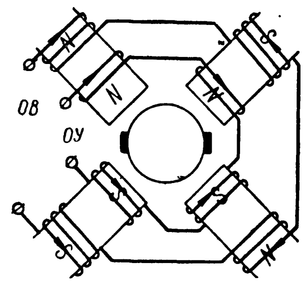


Рис. 8. Схема включения обмоток возбуждения двухколлекторного ЭМУ.

На рис. 9 показана принципиальная схема двухступенчатого двухколлекторного усилителя в двух — четырехполюсном исполнении.

При отсутствии насыщения намагничивающая сила двухполюсной системы возбуждения будет под двумя полюсами вычитаться из намагничивающей силы четырехполюсной системы, а под двумя другими полюсами — прибавляться, и, таким образом, среднее значение н. с. четырехполюсной системы не изменится. Следовательно, наложение двухполюсной намагничивающей силы не изменяет индуктируемой в четырехполюсной обмотке якоря э. д. с.

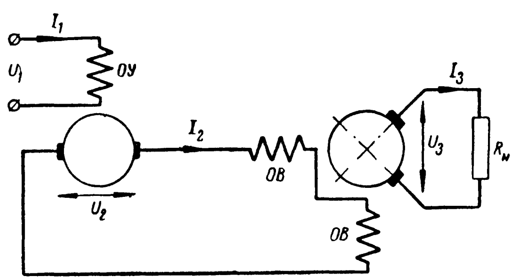


Рис. 9. Принципиальная схема двухступенчатого двухколлекторного ЭМУ.

Напряжение на якоре первой ступени может быть выбрано из условия получения хорошей коммутации.

Для выходной ступени можно предусмотреть два дополнительных полюса, расположенных под прямым углом к нейтрали двухполюсной системы возбуждения. Если по условиям коммутации требуется четыре дополнительных полюса, то два из них могут быть использованы одновременно для первой и второй ступеней.

Более мощная выходная ступень ЭМУ в основном определяет размеры машины, первая же ступень, расположенная на том же якоре и статоре, имеет низкое использование активных материалов. При этом должны получаться хорошие усилительные свойства, однако они сильно ухудшаются за счет того, что общий воздушный зазор, величина которого определяется выходной ступенью, велик [см. уравнение (2)]. Чтобы исключить этот недостаток, можно предусмотреть в выходной ступени распределенную компенсационную обмотку, применение которой позволит уменьшить воздушный зазор.

Для уменьшения гистерезиса ярмо статора приходится выполнять шихтованным, что усложняет конструкцию машины и делает ее малоэкономичной. Кроме того, значительное влияние на работу

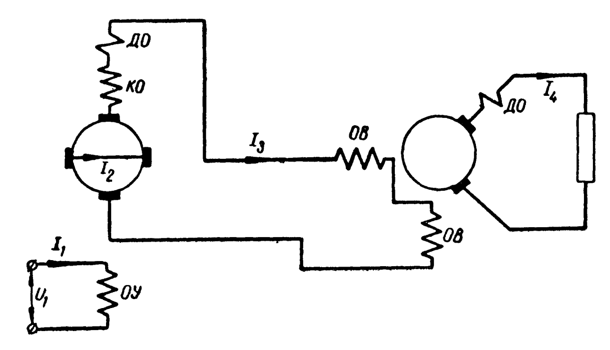


Рис. 10. Принципиальная схема трехступенчатого двухколлекторного ЭМУ.

машины оказывает асимметрия магнитной системы, при которой в двухполюсной обмотке якоря будет наводиться э. д. с. от четырехполюсной системы статора, а в четырехполюсной обмотке якоря — — от двухполюсной системы.

Поэтому двухколлекторные ЭМУ не получили широкого распространения в технике.

В Англии они выпускаются фирмой Инглиш Электрик Компани под названием «магнавольт».

Двухколлекторный ЭМУ может быть трехступенчатым. Для этого на коллекторе двухполюсной системы устанавливаются две пары щеток, одна из которых располагается по поперечной оси и замкнута накоротко, а вторая, расположенная по продольной оси, последовательно соединяется с компенсационной обмоткой двухполюсной системы. Принципиальная схема двухколлекторного трехступенчатого ЭМУ показана на рис. 10.

Первые две ступени представляют собой машины поперечного поля, принцип действия и теория которых будут описаны в дальнейшем.

Трехступенчатый двухколлекторный ЭМУ имеет те же недостатки, что и двухступенчатый, и, кроме того, он еще сложнее по конструкции из-за необходимости размещения двух компенсационных обмоток и двух пар щеток.

5. ДВУХ- И ТРЕХСТУПЕНЧАТЫЕ ЭМУ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

Такого же эффекта, как и в двухколлекторных ЭМУ, можно добиться и при наличии одной обмотки и одного коллектора на якоре. Эти ЭМУ получили название двух- и трехступенчатых ЭМУ продольного поля.

На статоре такой машины располагаются четыре главных полюса. Якорь должен обязательно иметь четырехполюсную петлевую обмотку без уравнительных соединений с диаметральным или несколько укороченным шагом.

Четырехполюсная система статора и якоря образует выходную ступень ЭМУ. Для входной ступени используется двухполюсная си-

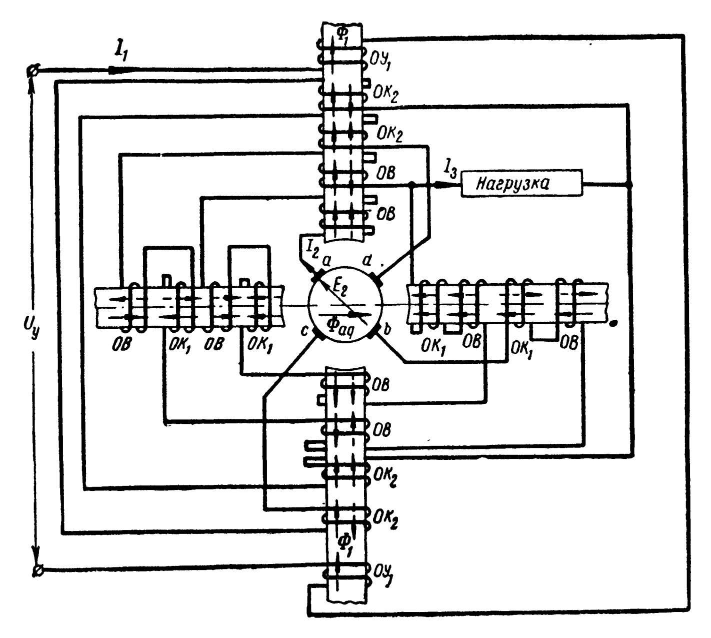


Рис. 11. Схема включения обмоток двухступенчатого ЭМУ продольного поля.

стема, образуемая двумя противоположными полюсами и той же обмоткой якоря. Таким образом, для входной двухполюсной системы обмотка якоря будет иметь полудиаметральный шаг.

На рис. 11 показана принципиальная схема двухступенчатого ЭМУ. Ток I_1, протекающий по обмотке управления $ОУ_1$, расположенной на двух противоположных полюсах, создает н. с. управления $F_у$. Поток $Ф_1$, созданный этой н. с., наведет в обмотке якоря э. д. с. E_2, снимаемую со щеток *ab*. Эта э. д. с. используется для питания обмотки возбуждения *ОВ* второй ступени, расположенной на всех четырех полюсах.

Намагничивающая сила реакции якоря от тока через щетки *ab*, как это будет показано ниже при анализе ЭМУ с полудиаметраль-

ным шагом (см. § 9), имеет трапецеидальную форму. Поток этой реакции якоря Φ_{aq} направлен по оси, перпендикулярной оси полюсов, на которых расположена обмотка управления. Для его компенсации применяется компенсационная обмотка OK_1.

Магнитный поток четырехполюсной обмотки возбуждения наведет э. д. с. в обмотке якоря. Нагрузка подключается к средним точкам цепей соседних щеток *ad*. Ток нагрузки I_3 будет протекать также по обмоткам возбуждения *ОВ* и компенсационной OK_1. По одной половине этих обмоток будет течь ток $\left(I_2+\frac{I_3}{2}\right)$, по другой половине $\left(I_2-\frac{I_3}{2}\right)$. Для исключения намагничивающего влияния тока нагрузки все катушки обмоток *ОВ* и *ОК* разделены на две равные части. Эти части наматываются в бифиляр (проводники обеих частей каждой катушки наматываются в параллель) и соединяются таким образом (рис. 11), чтобы н. с. от тока $\frac{I_3}{2}$ взаимно компенсировались (на рис. 11 эти потоки показаны пунктирными стрелками).

Часто в перемычку щеток *cd* включаются дополнительная компенсационная обмотка OK_2, расположенная по оси управления, и противодействующая обмотка, расположенная на полюсах, перпендикулярных оси управления. Компенсационная обмотка OK_2 служит для компенсации продольной реакции якоря.

Для улучшения условий коммутации в ЭМУ продольного поля можно применять дополнительные полюсы, обмотка дополнительных полюсов обтекается током якоря всех ступеней. Применение дополнительных полюсов позволяет использовать также ЭМУ на большие мощности.

В ряде случаев на выход ЭМУ включается параллельная обмотка самовозбуждения, настраиваемая на сопротивление, близкое к критическому.

Трехступенчатый ЭМУ продольного поля может быть образован из двухступенчатого, если щетки первой ступени *ab* замкнуть накоротко. В такой машине нет необходимости иметь компенсационную обмотку на полюсах, перпендикулярных оси управления, поскольку поток реакции якоря от тока короткозамкнутых щеток является рабочим потоком и создает одну из ступеней усиления (рис. 12). К другим щеткам (*cd*) подключается обмотка возбуждения выходной ступени *ОВ* и компенсационная обмотка *ОК*, расположенная на тех же полюсах, что и обмотка управления. Эта обмотка компенсирует продольную реакцию якоря двухполюсной системы Φ_{ad}, возникающей при протекании тока через щетки *cd*. Нагрузка подключается с одной стороны к средней точке перемычки, замыкающей накоротко щетки *ab*, а с другой — к средней точке цепи щеток *cd*, включающей обмотку возбуждения *ОВ* и компенсационную обмотку *ОК*. Так же как и в двухступенчатом ЭМУ, все катушки обмоток, обтекаемых током нагрузки, разделены на две равные части, намотанные в бифиляр, и соединены таким образом, чтобы исключить вредное влияние тока I_4 (рис. 12). Обмотка возбуждения вы-

ходной ступени может быть выполнена и в виде последовательной или параллельной обмотки самовозбуждения.

Таким образом, в многоступенчатых ЭМУ продольного поля можно получить очень высокий коэффициент усиления, достигающий в ряде машин 10^5.

Однако, как уже отмечалось выше, применение обмотки самовозбуждения значительно ухудшает быстродействие ЭМУ.

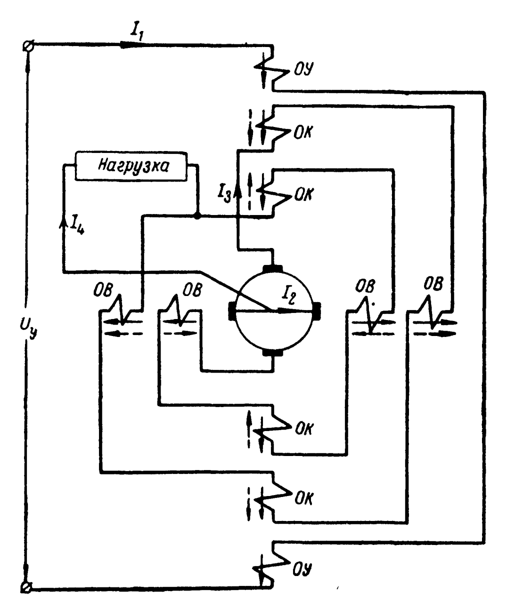


Рис. 12. Схема включения обмоток трехступенчатого ЭМУ продольного поля.

Двух- и трехступенчатые ЭМУ продольного поля могут быть изготовлены на базе обычных четырехполюсных машин постоянного тока.

Для улучшения быстродействия и уменьшения остаточного напряжения ярмо статора обычно изготавливается шихтованным.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭМУ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ

В машинах поперечного поля основным рабочим потоком, создающим э. д. с. на выходе машины, является поток поперечной реакции якоря. Он создается током, текущим по короткозамкнутой поперечной цепи якоря.

На рис. 13 показана принципиальная схема ЭМУ поперечного поля. Электродвижущая сила E_2 на щетках, расположенных по по-

перечной оси машины qq, невелика, поскольку она создана малым потоком управления $Ф_у$. Однако ток I_2, протекающий через эти щетки, будет сравнительно большим, так как сопротивление короткозамкнутой цепи (включающей обмотку якоря, переходной щеточный контакт, щетки и проводник, замыкающий их накоротко) мало.

Неподвижный в пространстве магнитный поток поперечной реакции якоря $Ф_q$, созданный током I_2, будет наводить в витках обмотки якоря э. д. с., максимальное значение которой E_3 будет сниматься щетками, расположенными по продольной оси машины dd.

Таким образом, отличительной чертой ЭМУ поперечного поля является наличие на коллекторе двух пар щеток, расположенных по продольной и поперечной осям машины. При включении нагрузки через продольные щетки по обмотке якоря пойдет ток нагрузки I_3, созданный им магнитный поток продольной реакции якоря $Ф_{da}$ будет направлен против потока управления $Ф_у$ и будет размагничивать машину. Для его компенсации на статоре размещена компенсационная обмотка, включенная последовательно с продольными щетками. Ток I_3, протекая по компенсационной обмотке, создает поток компенсации $Ф_к$, направленный против потока продольной реакции якоря. Для регулирования степени компенсации параллельно компенсационной обмотке обычно включается регулируемое шунтирующее сопротивление. Компенсационную обмотку, как правило, делают распределенной, с тем чтобы она наиболее точно компенсировала продольное поле якоря не только по величине, но и по форме.

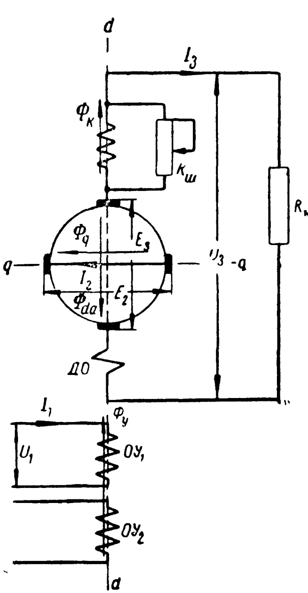


Рис. 13. Принципиальная схема поперечного поля.

Для улучшения условий коммутации продольных щеток, через которые протекает ток нагрузки, по продольной оси помещают дополнительные полюсы с обмоткой, включенной последовательно с компенсационной обмоткой.

По обмотке якоря ЭМУ поперечного поля текут два тока: ток поперечной цепи и ток нагрузки. На рис. 14,*а*, *б* и *в* показано распределение токов по проводникам обмотки якоря.

Как видно из рис. 14,*в*, в двух квадрантах якоря течет полусумма токов $\frac{I_2 + I_3}{2}$, а в двух других — полуразность $\frac{I_3 - I_2}{2}$.

ЭМУ поперечного поля представляет собой двухступенчатый усилитель. Первая ступень усиления — цепь управления — короткозамкнутая цепь якоря, вторая ступень — короткозамкнутая цепь якоря — цепь нагрузки. Таким образом, эквивалентную схему ЭМУ

поперечного поля можно представить как двухмашинный усилитель. Однако по сравнению с обычными двухмашинными усилителями ЭМУ поперечного поля имеют большие преимущества, заключающиеся в том, что, во-первых, обе ступени усиления совмещены в одной машине и, во-вторых, обмоткой возбуждения выходной ступени является распределенная обмотка якоря, обладающая значительно меньшей индуктивностью, чем сосредоточенная обмотка возбуждения выходной ступени любого ЭМУ продольного поля.

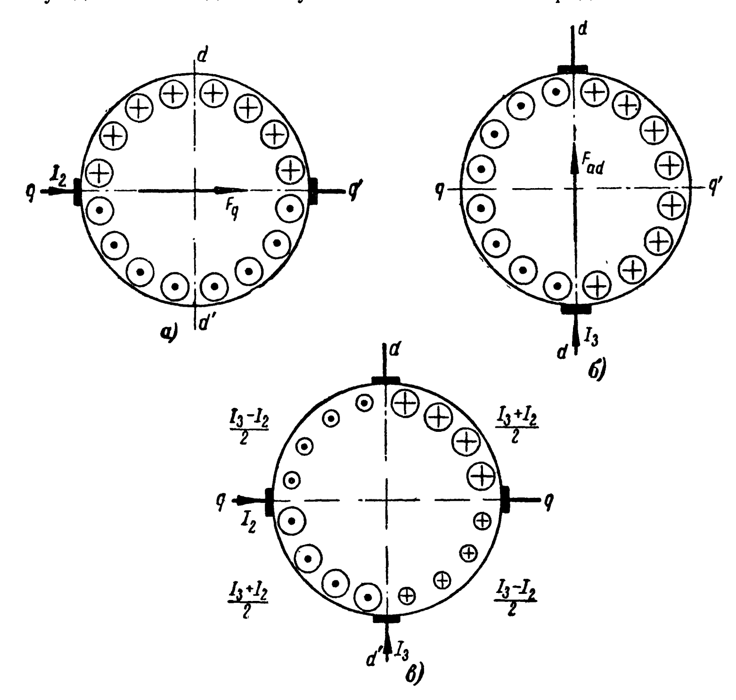


Рис. 14. Распределение тока по проводникам якоря.
а — ток поперечной цепи I_2; *б* — ток нагрузки I_3; *в* — сумма токов нагрузки и поперечной цепи.

Благодаря сравнительно малой инерционности поперечной цепи и ряду других факторов ЭМУ поперечного поля обладает высоким быстродействием (0,1—0,3 *сек*) при высоких значениях коэффициента усиления (100—10 000).

На рис. 15 показаны наиболее часто применяемая геометрия статора двухполюсного ЭМУ поперечного поля и схема расположения обмоток на статоре. Такая геометрия является наиболее целесообразной для ЭМУ поперечного поля мощностью примерно до 20 *квт*. Обычно на эти мощности ЭМУ изготавливаются в двухполюсном исполнении с неявновыраженными полюсами. Статор ЭМУ шихтуется из листов электротехнической стали и имеет три вида

пазов: большие, средние и малые. Благодаря наличию двух больших пазов в магнитной системе статора образуются два неявновыраженных полюса, расщепленных средними пазами.

В больших пазах находятся обмотки управления и часть компенсационной обмотки. В малых пазах размещается распределенная компенсационная обмотка, в средних пазах — обмотка дополнительных полюсов, являющаяся также частью компенсационной обмотки. Зубцы, расположенные между средними пазами, образуют дополнительные полюсы по продольной оси машины.

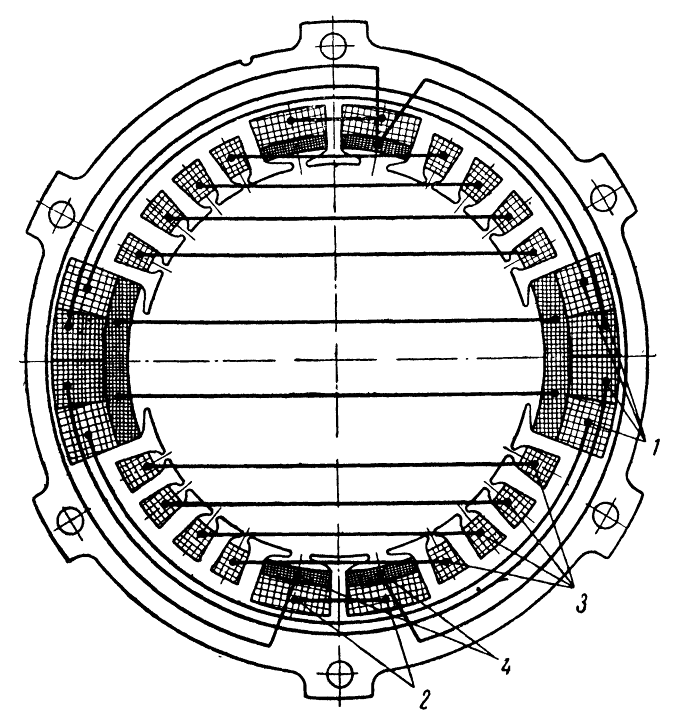


Рис. 15. Геометрия статора ЭМУ поперечного поля и схема расположения его обмоток.

1 — обмотки управления; 2 — обмотка дополнительных полюсов; 3 — компенсационная обмотка; 4 — поперечная подмагничивающая обмотка.

По поперечной оси машины дополнительных полюсов, как правило, не ставят. Поэтому для улучшения условий коммутации поперечных щеток часто принимаются дополнительные меры. Одной из наиболее эффективных мер является применение поперечной подмагничивающей обмотки, включенной в короткозамкнутую цепь якоря. Магнитный поток $\Phi_п$, созданный током поперечной цепи якоря I_2, направлен в том же направлении, что и поток поперечной реакции якоря Φ_2 (рис. 16). Применение поперечной обмотки позволяет

снизить ток I_2 и разгрузить поперечные щетки. Поперечная обмотка размещается в средних пазах (рис. 15).

Конструкция якоря ЭМУ такая же, как у обычных машин постоянного тока. Обмотка простая петлевая, обычно с небольшим укорочением. Для уменьшения ширины коммутационной зоны стараются выбирать максимальное число коллекторных пластин и минимальное число витков в секциях якоря.

На рис. 17 показана форма распределения н. с. якоря (рис. 17,*а*) и соответствующего ей поля в воздушном зазоре (рис. 17,*б*). Про-

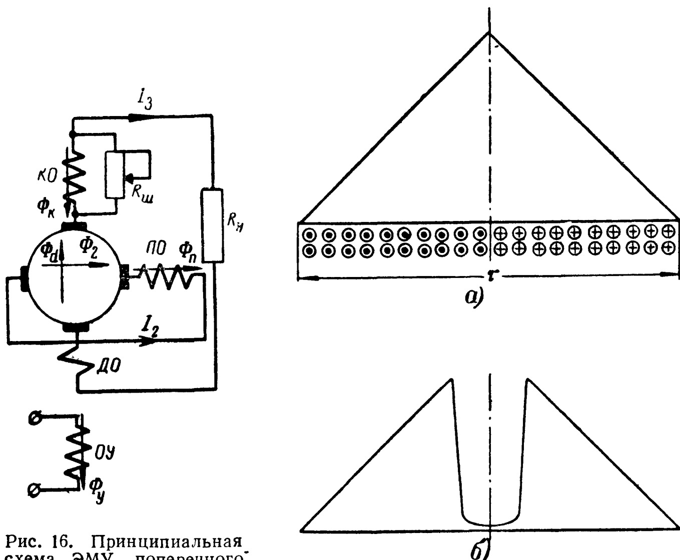


Рис. 16. Принципиальная схема ЭМУ поперечного поля с поперечной подмагничивающей обмоткой. *ПО* — поперечная обмотка.

Рис. 17. Форма распределения н. с. обмотки якоря (*а*) и поля в воздушном зазоре ЭМУ поперечного поля (*б*).

валы кривой поля соответствуют большим пазам статора. Поперечные щетки расположены в зоне больших пазов, где магнитный поток мал и поэтому наводимая им э. д. с. в коммутируемых секциях также невелика.

Величина н. с. управления, действующая по продольной оси, очень мала, и поэтому в ЭМУ поперечного поля приходится учитывать ряд факторов, которыми в обычных машинах постоянного тока пренебрегают. Такими факторами являются сдвиг щеток с нейтрали и размагничивающее действие коммутационных токов и потерь в стали. Их н. с. действуют по продольной оси и соизмеримы с намагничивающей силой управления.

При сдвиге поперечных щеток с нейтрали н. с. якоря можно представить состоящей из двух составляющих, одна из которых действует по поперечной, другая — по продольной оси. Величина

и направление продольной составляющей зависят от расстояния щеток от нейтрали и направления их сдвига. Если щетки сдвинуты в противоположном вращению якоря направлении, то легко видеть (рис. 18,*а*), что продольная составляющая действует в том же направлении, что и н. с. управления (подмагничивает машину). Если щетки сдвинуты по направлению вращения якоря, то продольная составляющая действует в направлении, противоположном н. с. управления, т. е. размагничивает машину (рис. 18,*б*). Поскольку н. с.

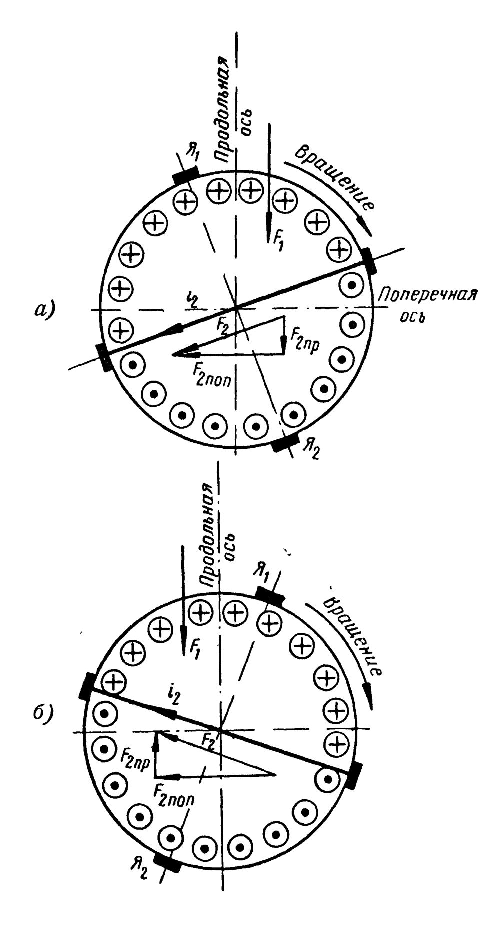


Рис. 18. Распределение тока I_2 и направление н. с. F_2 обмотки якоря при сдвиге поперечных щеток с нейтрали.

а — против направления вращения; *б* — по направлению вращения, $F_{2пр}$, $F_{2поп}$ — продольная и поперечная составляющие намагничивающей силы обмотки якоря F_2.

управления мала, то уже очень небольшой сдвиг поперечных щеток относительно нейтрали будет значительно сказываться на параметрах ЭМУ. При сдвиге щеток против направления вращения якоря коэффициент усиления за счет подмагничивания будет увеличиваться. Однако при этом возникает опасность самовозбуждения машины от продольной составляющей н. с. якоря и, следовательно, потери управления. Поэтому обычно в ЭМУ поперечного поля применяется небольшой (на 1—3°) сдвиг щеток с нейтрали по направлению вращения якоря машины. При этом уменьшается коэффициент усиления, зато ЭМУ работает более надежно и устойчиво.

Продольные и поперечные щетки, как правило, устанавливаются на одну траверсу, т. е. при сдвиге поперечных щеток сдвигаются с продольной оси и продольные щетки. Но сдвиг продольных щеток практически не влияет на работу ЭМУ, так как поперечная составляющая от некомпенсированной н. с. продольной реакции якоря несоизмеримо мала по сравнению с поперечной н. с. якоря.

Коммутация поперечных щеток из-за отсутствия дополнительных полюсов по поперечной оси замедленная. Можно показать, что при этом ток в секциях, коммутируемых поперечными щетками, будет создавать намагничивающую силу, направленную по продольной оси против н. с. управления.

Кроме коммутационных токов, размагничивающее действие по продольной оси оказывают вихревые токи и гистерезис в стали якоря от его поперечного магнитного потока. Намагничивающие силы коммутационных токов и потерь в стали соизмеримы с н. с. управления и оказывают значительное влияние на работу ЭМУ.

Все указанные факторы являются функцией тока поперечной цепи якоря, и поэтому их называют реакцией тока поперечной цепи на продольное поле. Она как бы является внутренней отрицательной обратной связью, уменьшающей коэффициент усиления, и, как будет показано ниже, улучшает быстродействие ЭМУ.

Ширину щеток в ЭМУ поперечного поля выбирают как можно меньшей. Это уменьшает ширину коммутационной зоны и снижает размагничивающее действие коммутационных токов, поскольку при узкой щетке перекрывается меньшее число коллекторных пластин и, следовательно, меньше секций находится в коммутации. Обычно щетки перекрывают 1—1,5 коллекторные пластины. Кроме того, уменьшение ширины коммутационной зоны позволяет улучшить использование машины.

Материал щеток выбирают так, чтобы обеспечить хорошую коммутацию как поперечных, так и продольных щеток. В отечественных ЭМУ поперечного поля применяются электрографитированные щетки марок ЭГ-4 и ЭГ-8. Эти щетки обладают сравнительно высоким переходным сопротивлением и применяются при затрудненной коммутации. Большое переходное сопротивление благоприятно сказывается на уменьшении тока в коммутируемых секциях.

Приводной двигатель (асинхронный или постоянного тока) часто встраивается в один корпус с ЭМУ. Скорость вращения машины, как правило, составляет 3 000 или 1 500 *об/мин.* В самолетных ЭМУ скорость обычно бывает 4 000—6 000 *об/мин.* На рис. 19 приведен продольный разрез машины ЭМУ-12А со встроенным асинхронным двигателем.

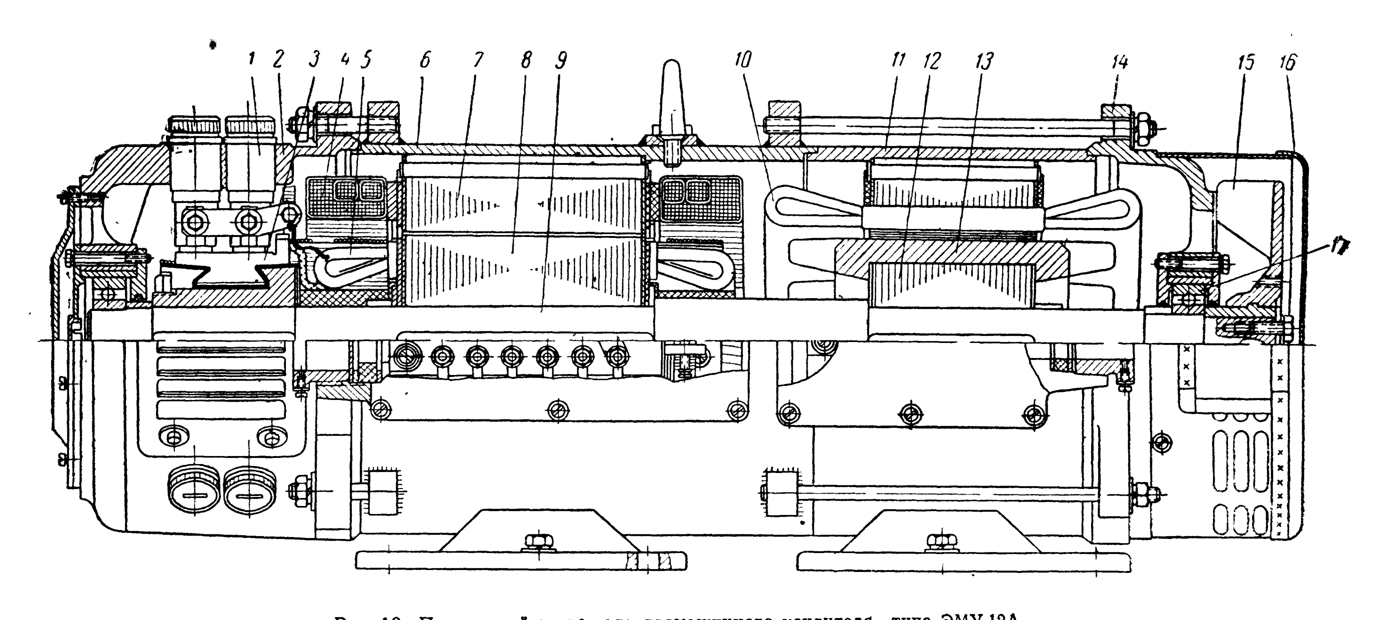


Рис. 19. Поперечный разрез электромашинного усилителя типа ЭМУ-12А.

1 — щеткодержатель; *2* — щит коллекторный; *3* — коллектор; *4* — обмотка статора; *5* — обмотка якоря; *6* — корпус ЭМУ; *7* — сердечник статора ЭМУ; *8* — сердечник якоря ЭМУ; *9* — вал; *10* — обмотка статора приводного двигателя; *11* — корпус приводного двигателя; *12* — сердечник ротора приводного двигателя; *13* — беличья клетка; *14* — подшипниковый щит; *15* — вентилятор; *16* — кожух вентилятора; *17* — подшипник.

7. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ

а) *Характеристика холостого хода.* Характеристики холостого хода первой и второй ступени $E_{20}=f(I_1)$ и $E_{30}=f(I_2)$ даны на рис. 20. Начальная часть суммарной характеристики холостого хода $E_{30}=f(I_1)$ (рис. 20,*б*) отличается от прямой. Это объясняется тем, что при малых токах в короткозамкнутой поперечной цепи значительно сказывается нелинейность контакта поперечных щеток.

Ширина петли гистерезиса и величина остаточного напряжения у ЭМУ больше, чем в обычных генераторах постоянного тока. Это объясняется тем, что действие остаточного поля усиливается в двух

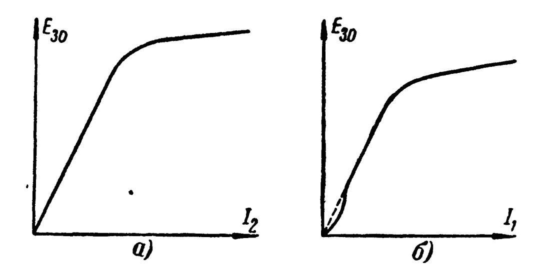


Рис. 20. Характеристика холостого хода ЭМУ поперечного поля.
а — характеристика холостого хода второй ступени; *б* — суммарная характеристика холостого хода.

ступенях машины. Остаточное напряжение отрицательно сказывается на работе систем автоматического регулирования, особенно следящих систем. При отсутствии сигнала управления от остаточного напряжения ЭМУ может возникнуть так называемая «ползучая» скорость исполнительного двигателя. Поэтому для уменьшения гистерезиса ярмо статора ЭМУ делают шихтованным из листов электротехнической стали. Кроме того, в ряде случаев применяют размагничивание переменным током. Наиболее простым и эффективным способом, используемым в отечественном электромашиностроении, является размагничивание ярма статора ЭМУ. Для этого на перемычках большого паза (рис. 21) помещают специальные обмотки, по которым пропускают переменный ток. Если в одном корпусе с ЭМУ помещен асинхронный двигатель, то напряжение переменного тока на размагничивающие обмотки подается от отпаек обмотки статора двигателя. Применение размагничивающих обмоток переменного тока может в несколько раз уменьшить величину остаточного напряжения.

ЭМУ, как правило, выполняется в номинальном режиме ненасыщенным, так чтобы номинальное напряжение лежало на линейной части характеристики холостого хода.

Пренебрегая нелинейностью щеточного контакта и гистерезисом, линейную часть характеристики холостого хода можно выразить аналитически.

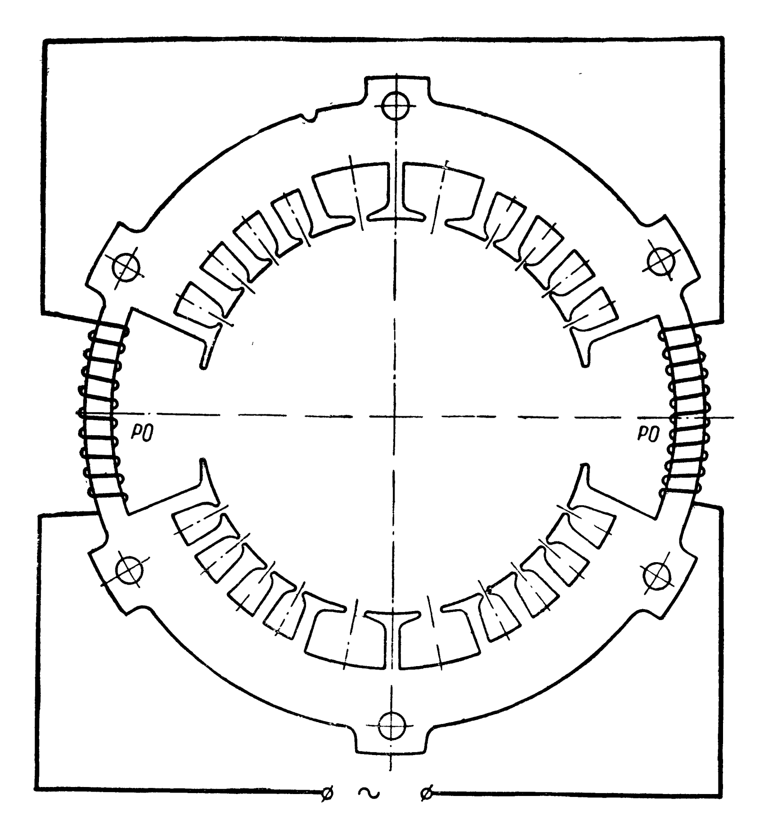


Рис. 21. Расположение размагничивающей обмотки.
РО — размагничивающая обмотка.

Характеристика холостого хода первой ступени:

$$E_{20} = c_d F_y, \tag{34}$$

где $F_y = w_y I_1$ — н. с. обмотки управления;
w_y — число витков обмотки управления;
c_d — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины.

Характеристика холостого хода второй ступени:

$$E_{30} = c_q F_q, \tag{35}$$

где $F_q = w_a I_2$ — намагничивающая сила поперечной реакции якоря;
w_a — число последовательно соединенных витков якоря;
c_q — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины: проводимости для поперечного магнитного потока, скорости вращения якоря и др.

Ток поперечной цепи I_2 равен:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{R_2}, \quad (36)$$

где R_2 — сопротивление поперечной цепи, включающее сопротивления обмотки якоря, переходного контакта щеток, внешних проводов.

Если бы не было реакции тока поперечной цепи на продольное поле, то уравнение суммарной характеристики холостого хода ЭМУ поперечного поля было бы:

$$E_{30} = c_q w_a \frac{E_2}{R_2} = \frac{c_d c_q w_a}{R_2} F_у. \quad (37)$$

Однако, когда поперечная цепь замкнута накоротко и по ней идет ток, по продольной оси, кроме н. с. управления, будут действовать н. с. реакции тока поперечной цепи: коммутационных токов $F_к$, потерь в стали $F_с$ и сдвига щеток $F_щ$. Отсюда

$$F_{d0} = F_у - (F_к + F_с \pm F_щ), \quad (38)$$

где F_{d0} — суммарная намагничивающая сила, действующая по продольной оси. Знак плюс перед $F_щ$ в уравнении (38) означает сдвиг щеток против направления вращения, знак минус — сдвиг по направлению вращения. Электродвижущая сила, наводимая F_{d0}, будет равна:

$$E_2 = c_d F_{d0}. \quad (39)$$

Размагничивающее действие различных факторов можно учесть, вводя понятия о приведенном сопротивлении поперечной цепи R_q:

$$R_q = R_2 c_f, \quad (40)$$

где $c_f = \frac{F_у}{F_{d0}}$ — коэффициент, учитывающий н. с. коммутационных токов, потерь в стали и сдвига щетки.

В ЭМУ поперечного поля R_q может быть в 2—3 раза больше, чем R_2.

Уравнение суммарной характеристики холостого хода с учетом размагничивающих факторов из уравнений (37) и (40) будет:

$$E_{30} = \frac{c_d c_q w_a}{R_q} F_у = \frac{c_1}{c_f} F_у; \quad (41)$$

$\frac{c_1}{c_f}$ — пропорционально тангенсу угла наклона суммарной характеристики холостого хода;

$$c_1 = \frac{c_d c_q w_a}{R_2}. \quad (42)$$

Обычно для получения большого коэффициента усиления номинальное напряжение выбирается на прямолинейной части характе-

ристики холостого хода ЭМУ. Однако в системах автоматического регулирования для увеличения быстродействия часто применяется форсировка возбуждения, при которой ток управления может быть увеличен в несколько раз по отношению к номинальному. Для оценки возможности форсировки возбуждения иногда применяется понятие «потолочного напряжения ЭМУ».

Потолочным напряжением $E_{3п}$ называют такое напряжение, при котором соответствующая ему н. с. управления будет вдвое больше н. с., которая требуется для создания этого же напряжения при предположении, что насыщение отсутствует (рис. 22).

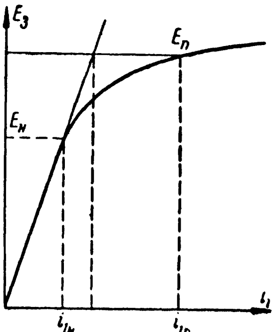


Рис. 22. Потолочное напряжение ЭМУ.

Отношение потолочного напряжения к номинальному $E_{3н}$ в ЭМУ поперечного поля

$$k_{пE} = \frac{E_{3п}}{E_{3н}} \qquad (43)$$

обычно берется в пределах 1,25—1,4, т. е. номинальное напряжение холостого хода выбирается равным 70—80% от потолочного.

Если номинальное напряжение холостого хода лежит на линейной части характеристики, то с помощью простых геометрических преобразований легко получить отношение н. с. управления, соответствующих потолочному и номинальному напряжению,

$$k_{пI} = \frac{I_{1п}}{I_{1н}} = 2k_{пE}. \qquad (44)$$

б) *Внешние характеристики.* Напряжение на выходе ЭМУ при токе нагрузки I_3 выражается:

$$U_3 = E_3 - I_3 R_3, \qquad (45)$$

где R_3 — сопротивление, включающее сопротивление обмотки якоря R_a, компенсационной обмотки $R_к$ с учетом шунтирующего сопротивления $R_ш$, обмотки дополнительных полюсов $R_д$ и переходного щеточного контакта $R_щ$.

Электродвижущая сила E_3 отличается от э. д. с. холостого хода E_{30}, так как при нагрузке по продольной оси, кроме н. с. F_{d0}, действует дополнительно н. с. ΔF_d,

$$\Delta F_d = F_{ad} - F_к, \qquad (46)$$

где $F_{ad} = w_a I_3$ — н. с. продольной реакции якоря;

$F_к$ — н. с. компенсационной обмотки;

$w_к$ — число витков компенсационной обмотки;

$I_3 \frac{R_ш}{R_к + R_ш}$ — ток в компенсационной обмотке при шунтировании ее сопротивлением $R_ш$.

В уравнении (46) $F_к$ можно выразить так:

$$F_к = w_к I_з \frac{R_ш}{R_к + R_ш}. \tag{47}$$

Отношение $F_к$ к F_a называют коэффициентом компенсации $k_к$,

$$k_к = \frac{F_к}{F_a}. \tag{48}$$

При полной компенсации $(F_к = F_a)\, k_к = 1$, при недокомпенсации $(F_к < F_a)\, k_к < 1$ и при перекомпенсации $(F_к > F_a)\, k_к > 1$.

Из уравнений (46) и (48) следует:

$$\Delta F_d = F_{ad}(1 - k_к). \tag{49}$$

При полной компенсации $(k_к = 1)\, \Delta F_d = 0$ и уравнение (45) примет вид:

$$U_з = E_{з0} - I_з R_з, \tag{50}$$

так как при этом по продольной оси будет действовать только н. с. F_{d0}.

При перекомпенсации или недокомпенсации по продольной оси действует н. с. F_d:

$$F_d = F_{d0} - \Delta F_d. \tag{51}$$

Соответствующая ей э. д. с. из уравнений (38) и (41) будет:

$$E_з = c_1 F_d = c_1 [F_{d0} - \Delta F_d] \tag{52}$$

или с учетом (41), (46)

$$E_з = E_{з0} - c_1 F_{ad}(1 - k_к). \tag{53}$$

Подставляя (53) в выражение для внешней характеристики (45), получим:

$$U_з = E_{з0} - I_з [R_з + c_2(1 - k_к)] = E_з - I_з R_{экв}, \tag{54}$$

где $c_2 = w_a c_1$ — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров ЭМУ;

$$R_{экв} = R_з + c_2(1 - k_к) \tag{55}$$

$R_{экв}$ — эквивалентное сопротивление, учитывающее степень компенсации машины и характеризующее тангенс угла наклона внешней характеристики.

Проанализируем уравнение (54), рассмотрев ряд случаев:

1) $k_к = 1$ — полная компенсация (рис. 23,*а*):

$$R_{экв} = R_з; \; U_з = E_{з0} - I_з R_з.$$

Наклон внешней характеристики (часто его называют жесткостью) определяется только внутренним сопротивлением продольной цепи

ЭМУ $R_з$, за счет которого характеристика имеет падающий характер. Такую характеристику при $k_к=1$ называют характеристикой естественной жесткости.

2) $k_к<1$ — ЭМУ недокомпенсирован. Внешняя характеристика падающая, наклон ее больше, чем у характеристики естественной жесткости.

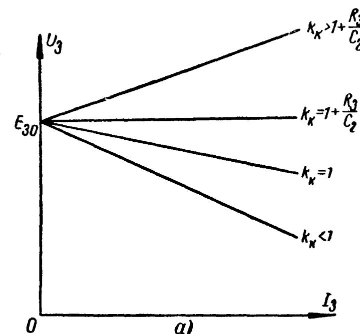
3) $k_к=0$ — машина некомпенсирована. Поток продольной реакции якоря размагничивает машину $U_з=0$.

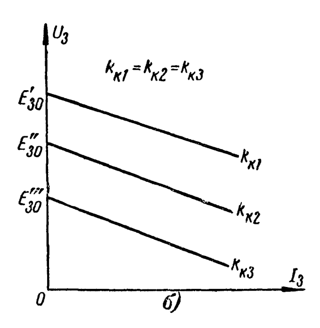
4) $R_{экв}=0$; $U_з=E_{з0}$ — внешняя характеристика параллельна оси абсцисс; машина перекомпенсирована ($k_к>1$). Из уравнения (55)

$$k_к = 1 + \frac{R_з}{c_2}. \qquad (56)$$

5) $k_к>1$ — машина перекомпенсирована. Если при этом $k_к > 1 + \frac{R_з}{c_2}$, внешняя характеристика возрастающая. При некотором значении $k_к>1$ наступит самовозбуждение ЭМУ.

6) $k_к=\text{const}$. При изменении тока управления I_1 наклон внешней характеристики не меняется.





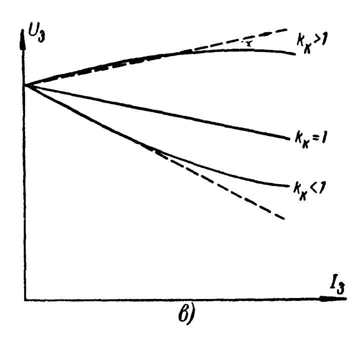


Рис. 23. Внешние характеристики ЭМУ.

а — при различных степенях компенсации; *б* — при различных токах управления и одной компенсации; *в* — влияние насыщения на внешние характеристики ЭМУ.

Электродвижущая сила холостого хода $E_з$ изменяется пропорционально току I_1 (рис. 23,*б*).

Таким образом, изменяя степень компенсации, можно получить любой наклон внешней характеристики.

Компенсационную обмотку проектируют с небольшой (примерно 5%) перекомпенсацией продольной реакции якоря ($k_к=1{,}05$). Сопротивление, шунтирующее компенсационную обмотку, делают обычно регулируемым, с тем чтобы можно было установить требуемый наклон внешней характеристики.

При перекомпенсации возможно произвольное самовозбуждение от случайного сдвига центра щеток с нейтрали. Это может быть связано с перетиркой щеток, изменением сопротивления щеточного контакта, изменением величины шунтирующего сопротивления и сопротивления компенсационной обмотки от разницы температуры их нагрева и других факторов.

Поэтому во избежание самовозбуждения и потери управления ЭМУ поперечного поля, как правило, при перекомпенсации не работают. Чаще всего ЭМУ настраивают на небольшую недокомпенсацию, так чтобы наклон внешней характеристики был близким к характеристике естественной жесткости ($k_к=0{,}97\div0{,}99$).

Такие факторы, как нелинейность щеточного контакта, насыщение магнитной цепи, гистерезис, оказывают влияние на линейность внешних характеристик. Поэтому в действительности внешние характеристики несколько отличаются от показанных на рис. 23,*а* и *б*.

Сопротивление щеточного контакта с увеличением тока I_3 меняется; особенно это сказывается при малых плотностях тока, поэтому внешняя характеристика в начальной части несколько отличается от прямой линии.

В реальных условиях, когда характеристика холостого хода имеет вид петли, внешние характеристики будут также иметь вид петли, что уменьшает жесткость характеристик. При малой петле гистерезиса характеристики холостого хода этот эффект на внешние характеристики влияет незначительно.

При насыщении ЭМУ поперечного поля жесткость и линейность внешних характеристик меняются. С увеличением насыщения жесткость внешних характеристик увеличивается (рис. 23,*в*). Это легко видеть из анализа уравнения (54), где коэффициент c_2 пропорционален проводимости для магнитного потока по продольной и поперечной осям и поэтому при насыщении он будет уменьшаться, а следовательно, будет увеличиваться жесткость характеристик.

Таким образом, внешние характеристики, снятые при различных токах управления, но при одном и том же коэффициенте компенсации ($k_к=\mathrm{const}$) будут иметь разные жесткости, если при каком-либо токе управления имеет место насыщение магнитной системы.

Из уравнения (55) видно, что внешняя характеристика при полной компенсации ($k_к=1$) — характеристика «естественной жесткости» с насыщением сохраняет свой линейный характер.

в) *Коэффициент усиления.* Коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля

$$k_у=\frac{U_3I_3}{I_1^2R_у}, \tag{57}$$

где $R_у$ — сопротивление обмотки управления.

Поскольку ЭМУ поперечного поля является двухступенчатым усилителем, его коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления обеих ступеней. Если выразить общий коэффи-

циент усиления через конструктивные параметры машины, то, учитывая уравнение (9), можно показать:

$$k_{у} = \frac{k}{k_E k_{ж} \nu c_f} n^2 \frac{A_1 A_2}{B_{\delta 1} B_{\delta 2}} \cdot \frac{D_{я}^2}{\delta^2 k_{\delta}^2} T_{у} T_2, \tag{58}$$

где A_1, A_2 — линейные нагрузки от токов I_2 и I_3;

$B_{\delta 1}$, $B_{\delta 2}$ — индукция в воздушном зазоре для первой и второй ступеней $B_{\delta 2} \gg B_{\delta 1}$;

$\nu = \frac{R_q}{R_a}$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления поперечной цепи за счет щеточного контакта;

$T_{у}$; T_2 — постоянные времени обмотки управления и короткозамкнутой поперечной цепи.

Из уравнения (58) видно, что коэффициент усиления прямо пропорционален квадрату скорости вращения, квадрату диаметра якоря, линейным нагрузкам якоря от токов I_1 и I_3, постоянным времени цепей управления и поперечной цепи; обратно пропорционален квадрату эффективного воздушного зазора, индукциям в воздушном зазоре, коэффициентам, учитывающим насыщение, реакцию тока поперечной цепи на продольное поле c_f, и сопротивлению щеточного контакта поперечной цепи.

Из этого следует, что для получения хороших свойств ЭМУ поперечного поля следует проектировать высокоскоростными, ненасыщенными, с минимальным воздушным зазором. Однако следует иметь в виду, что коэффициент c_f, характеризующий реакцию коммутационных токов, потерь в стали и сдвига щеток, также в большой степени зависит от скорости вращения и с ее повышением также увеличивается. Поэтому с ростом скорости при некотором ее значении коэффициент усиления может снижаться.

Распределенная компенсационная обмотка, применяемая в ЭМУ поперечного поля, способствует возможности изготовления ЭМУ с минимальным воздушным зазором, однако степень компенсации [в (58) от нее зависит коэффициент k_E] влияет на величину коэффициента усиления.

Для рассмотрения этого влияния представим уравнение (57) с учетом (54) в следующей форме:

$$k_{у} = \frac{E_3 I_3}{U_1 I_1} - \frac{I_3^2 R_{экв}}{I_1^2 R_1}. \tag{59}$$

Анализируя уравнение (59) и учитывая, что $R_{экв} = R_3 + c_2 \times \times (1 - k_{к})$, можно получить зависимость коэффициента усиления от степени компенсации при прочих равных условиях.

Из уравнения (59) можно также получить зависимость коэффициента усиления от тока нагрузки. С изменением I_3 коэффициент усиления будет меняться по сложному закону, определяемому $R_{экв}$ (рис. 24):

а) при $R_{экв}=0$; $k_у \approx I_з$ — прямая линия, проходящая через начало координат;

б) при $R_{экв}<0$ (перекомпенсация) прямая складывается с параболой и $k_у$ с увеличением тока неограниченно возрастает.

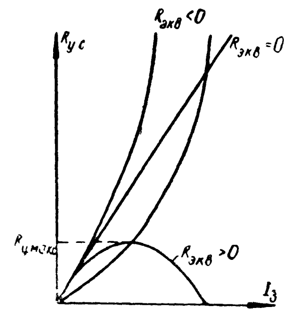


Рис. 24. Зависимость коэффициента усиления от тока нагрузки при различных $R_{экв}$.

в) при $R_{экв}>0$ (недокомпенсация) парабола вычитается из прямой, $k_у$ с увеличением тока $I_з$ возрастает до максимума, а затем падает до нуля.

Указанный анализ приведен в предположении, что насыщение отсутствует. В действительности же при насыщении отношение $E_{з0}/I_1$ в уравнении (59) резко уменьшается, а следовательно, уменьшается коэффициент усиления. Поэтому при перекомпенсации коэффициент усиления с увеличением тока $I_з$ растет только до момента насыщения машины, а при недокомпенсации с насыщением более резко падает.

8. БЫСТРОДЕЙСТВИЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Без учета взаимной индуктивности продольной и поперечной цепей, обусловленной размагничивающим действием коммутации, потерь в стали и эффектом сдвига щеток, ЭМУ поперечного поля можно представить как двухмашинный усилитель. Переходный процесс нарастания напряжения холостого хода на выходе ЭМУ может быть описан теми же уравнениями, что и для двухмашинного усилителя. Решение этих уравнений в операторной форме имеет вид:

$$E_з = \frac{k_1 k_2 U_1}{(1+pT_1)(1+pT_2)}, \tag{60}$$

где k_1, k_2 — коэффициенты усиления по напряжению первой и второй ступеней;

U_1 — напряжение на обмотке управления;

$T_1 = \frac{L_у}{R_у}$ — постоянная времени обмотки управления;

$T_2 = \frac{L_a}{R_2}$ — постоянная времени поперечной цепи;

L_a — индуктивность обмотки якоря.

Таким образом, быстродействие ЭМУ зависит в первую очередь от двух постоянных времени: цепей управления и короткозамкнутой поперечной.

В системах автоматического регулирования обмотки управления ЭМУ часто питаются от электронного усилителя или в цепь управления включаются большие активные сопротивления. Это в значительной степени снижает постоянную времени цепи управления $T_у$. Определяющей быстродействие в этом случае является постоянная времени поперечной цепи.

Рассмотрим влияние реакции тока поперечной цепи на переходные процессы. Делая указанные выше допущения (отсутствие насыщения, гистерезиса, постоянство сопротивления щеточного контакта), а также считая, что реакция тока поперечной цепи оказывает влияние только на переходный процесс в цепи управления, а влиянием ее на переходный процесс в поперечной цепи можно пренебречь (как незначительным), получим следующую систему уравнений нарастания напряжения в переходном процессе:

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M_q \frac{di_2}{dt} \pm M_{щ} \frac{di_2}{dt}; \tag{61}$$

$$E_2 = k_1 i_1 - k_q i_2 \pm k_{щ} i_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}; \tag{62}$$

$$E_3 = k_3 i_2, \tag{63}$$

где M_q — взаимная индуктивность между обмотками управления и поперечной цепью, обусловленная реакцией тока поперечной цепи от коммутационных токов и потерь в стали;

$M_{щ}$ — взаимная индуктивность между обмотками управления и поперечной цепью, обусловленная сдвигом щеток с нейтрали (со знаком минус при сдвиге по направлению вращения; со знаком плюс — против направления вращения);

$k_q i_2 \pm k_{щ} i_2$ — составляющие э. д. с. от реакции тока поперечной цепи.

Систему можно представить в операторной форме;

$$u_1 = i_1 (R_1 + pL_1) - i_2 p M_{12}; \tag{64}$$

$$E_2 = k_1 i_1 - k_{12} i_2 = i_2 (R_2 + pL_2), \tag{65}$$

где

$$M_{12} = M_q \pm M_{щ};$$

$$k_{12} = k_q \pm k_{ш}.$$

Преобразуем уравнение (65):

$$E_2 = k_1 i_1 = i_2 [(R_2 + k_{12}) + pL_2] = i_2 (R_q + pL_2), \tag{66}$$

где $R_q = R_2 + k_{12}$ — сопротивление поперечной цепи.

Из уравнений (64) и (40) получим:

$$k_{12} = R_2 (c_f - 1).$$

Решая совместно системы уравнений (64) и (65), получим:

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{L_1 L_2} \cdot \frac{1}{p^2 + A_1 p + A_2}, \tag{67}$$

где

$$A_1 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2'} - \frac{k_1 M_{12}}{L_1 L_2}; \tag{68}$$

$$A_2 = \frac{1}{T_1 T_2'}; \tag{69}$$

$T_2' = \frac{L_2}{R_q}$ — эквивалентная постоянная времени поперечной цепи.

С увеличением R_q реакция тока поперечной цепи будет уменьшать T_2' и, таким образом, быстродействие будет увеличиваться.

Корни характеристического уравнения:

$$p_1, p_2 = -\frac{A_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A_1}{2}\right)^2 - A_2}. \tag{70}$$

Анализ корней характеристического уравнения показывает, что в зависимости от значения M_{12} переходной процесс нарастания напряжения может быть как апериодическим, так и колебательным.

Как известно, апериодический процесс будет при условии, если $\left(\frac{A_1}{2}\right)^2 \geqslant A_2$ или из уравнений (68), (69):

$$\left[\frac{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2'} - \frac{k_1 M_{12}}{L_1 L_2}}{2}\right]^2 \geqslant \frac{1}{T_1 T_2'}. \tag{71}$$

Можно показать, что в ЭМУ поперечного поля всегда

$$\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2'} \gg \frac{k_1 M_{12}}{L_1 L_2} \tag{72}$$

и величиной $\frac{k_1 M_{12}}{L_1 L_2}$ в уравнении (71) можно в первом приближении пренебречь. Выразив отношение

$$\frac{T_1}{T_2} = n \tag{73}$$

и преобразовав (71), получим условие возникновения апериодического процесса:

$$\frac{1}{n} + 2 + n \geqslant 4c_f. \tag{74}$$

Таким образом, характер переходного процесса в ЭМУ поперечного поля зависит от соотношения постоянных времени цепи управления и короткозамкнутой цепи якоря n и от реакции тока поперечной цепи c_f. При сдвиге щеток по направлению вращения якоря коэффициент c_f увеличивается, при сдвиге против направления вращения — уменьшается.

Уравнение апериодического процесса будет:

$$i_2 = \frac{k_1}{R_1 R_q}\left[1 + e^{p_1 t}\left(\frac{p_2}{p_1 - p_2}\right) - e^{p_2 t}\left(\frac{p_1}{p_1 - p_2}\right)\right], \tag{75}$$

где p_1, p_2 — корни характеристического уравнения (70).

Уравнение колебательного процесса

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{R_1 R_q}\left[1 - e^{\alpha t}\left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega}\sin \omega t\right)\right]. \tag{76}$$

Декремент затухания

$$\alpha = -\frac{A_1}{2}; \tag{77}$$

угловая частота

$$\omega = \sqrt{A_2 - \left(\frac{A_1}{2}\right)^2}. \tag{78}$$

Поскольку из уравнения (72) ясно, что всегда $A_1 > 0$, колебательный процесс затухающий. Можно показать, что α почти не зависит от реакции тока поперечной цепи, а ток влияет только на частоту ω.

Из уравнений (78) и (69) видно, что чем больше реакция тока поперечной цепи c_f, тем быстрее происходит затухание колебаний.

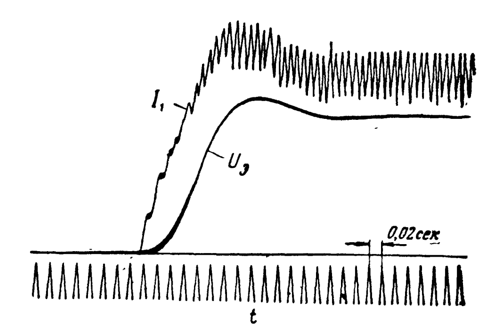


Рис. 25. Нарастание напряжения холостого хода ЭМУ поперечного поля при сдвиге щеток с нейтрали.

Следовательно, с увеличением сдвига щеток по направлению вращения якоря будет меняться характер переходного процесса и увеличиваться быстродействие ЭМУ.

На рис. 25 показаны осциллограммы переходного процесса нарастания напряжения холостого хода машины ЭМУ-12, снятые при сдвиге щеток с нейтрали по направлению вращения.

При нагрузке ЭМУ большое влияние на переходной процесс

оказывают характер нагрузки и степень компенсации продольной реакции якоря.

При полной компенсации взаимоиндуктивностью между цепью нагрузки и цепью управления обычно пренебрегают. При недокомпенсации или перекомпенсации эту взаимоиндуктивность необходимо учитывать. Следует учитывать также то, что контур компенсационной обмотки замкнут.

Решение системы дифференциальных уравнений переходного процесса с учетом всех этих факторов весьма сложно и редко применяется для практических расчетов.

9. ЭМУ С ПОЛУДИАМЕТРАЛЬНЫМ ШАГОМ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Применение полудиаметрального шага обмотки якоря в ЭМУ поперечного поля позволяет получить машину, обладающую новыми качествами.

Рассмотрим распределение тока по проводникам полудиаметральной обмотки якоря (рис. 26). Оно будет отличаться от распределения тока при диаметральном шаге (рис. 14). При полудиаметральном шаге ток в проводнике *1* (рис. 25,*а*) в верхней части паза будет в нижней части другого паза идти по проводнику *1'* и т. д. По распределению тока короткозамкнутой цепи (ток через щетки *ab*, рис. 26,*а*) якорь можно разделить на четыре зоны: в двух зонах токи в проводниках верхнего и нижнего слоя текут в одном и том же направлении (зоны *ae*, *bf*), в двух других зонах — в противоположном направлении (зоны *af*, *be*). Очевидно, что поток, созданный обмоткой якоря (поперечная реакция якоря), при таком распределении будет направлен по горизонтальной (поперечной) оси машины *qq'*. В проводниках якоря при вращении в этом потоке будет наводиться электродвижущая сила, максимальное значение которой будет на щетках, расположенных по оси *ef*.

Кривая н. с. обмотки якоря благодаря большому сокращению шага будет иметь трапецеидальную форму (рис. 27).

Распределение тока нагрузки в проводниках (рис. 25,*б*) подобно распределению тока короткозамкнутой цепи, но сдвинуто относительно его на 90° по направлению вращения. Поток продольной реакции якоря от тока нагрузки будет направлен по продольной оси dd_1.

При работе машины, когда по обмотке якоря протекает ток нагрузки и короткозамкнутой цепи, ток в любом проводнике есть алгебраическая сумма этих токов. В одних проводниках токи друг с другом складываются, в других проводниках — вычитаются. На рис. 26,*в* большими кружками обозначены проводники, несущие сумму токов, малыми — разность. Сумма токов в проводниках верхнего и нижнего слоев во всех пазах одинакова.

Из распределения токов видно, что продольный и поперечный потоки реакции якоря действуют в активной части якоря независимо один от другого. Это дает возможность для каждого магнитного потока выбрать оптимальный магнитопровод в активной его части (воздушный зазор и зубцовая зона). Кроме того, поскольку шаг обмотки якоря полудиаметральный, обмотку управления можно разместить на полюсах, занимающих примерно $^1/_4$ окружности, а компенсационную обмотку делать сосредоточенной или не полно

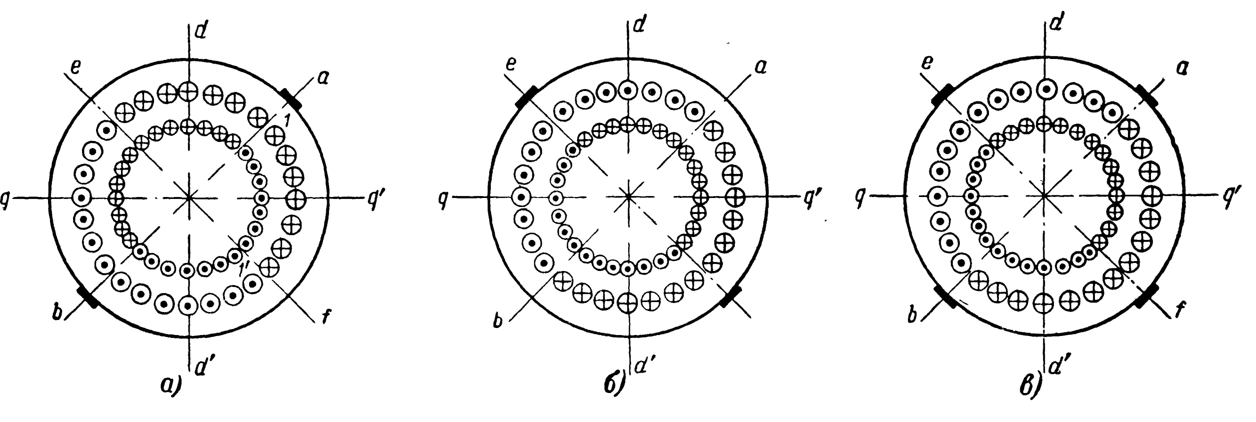


Рис. 26. Распределение тока по проводникам якоря в ЭМУ с полудиаметральным шагом обмотки якоря.
а — ток короткозамкнутой цепи; *б* — ток нагрузки; *в* — сумма токов нагрузки и короткозамкнутой цепи.

стью распределенной. Разделение поперечных и продольных потоков в активной зоне магнитопровода и сосредоточенная компенсационная обмотка позволяют поместить в машине внутренний нелинейный элемент в виде вставных зубцов малого сечения, на которые надеваются катушки одной из обмоток управления. Во время работы машины эти зубцы быстро насыщаются; в то время как остальной магнитопровод остается ненасыщенным. Вторая обмотка управления охватывает большее сечение магнитопровода.

ЭМУ с полудиаметральным шагом могут выполняться как с внутренним нелинейным элементом, так и без него.

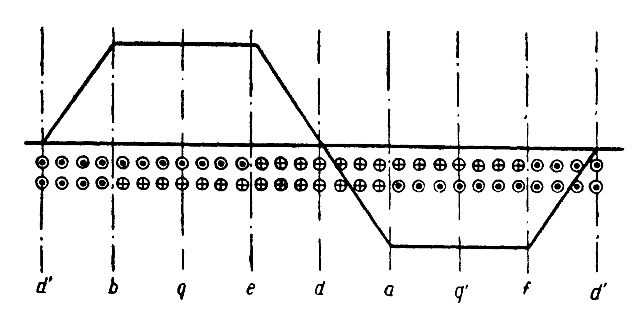


Рис. 27. Кривая распределения н. с. обмотки якоря в воздушном зазоре ЭМУ с полудиаметральным шагом обмотки якоря.

На рис. 28 показан магнитопровод статора ЭМУ с полудиаметральным шагом, насыщенным участком магнитной цепи и с расположением на нем обмоток.

Поперечные полюсы служат для проведения основного рабочего потока машины, продольные полюсы — для проведения потоков управления и других потоков, действующих по продольной оси. На поперечных полюсах имеются пазы для компенсационной обмотки. Такое расположение компенсационной обмотки позволяет с большой точностью компенсировать трапецеидальную н. с. продольной реакции якоря.

Для улучшения быстродействия и уменьшения остаточного напряжения весь магнитопровод делается шихтованным.

Вставные зубцы для более быстрого их насыщения обычно изготавливаются шихтованными из пермаллоя или другой стали, быстронасыщающейся и с высоким значением магнитной проницаемости. Отштампованные листы зубцов скрепляются между собой медной шиной, выполняющей одновременно роль короткозамкнутого витка демпферной обмотки.

Условия коммутации в ЭМУ с полудиаметральным шагом значительно лучше, чем у обычных ЭМУ поперечного поля с диаметральным шагом. Это объясняется тем, что при полудиаметральном шаге обмотки якоря реактивная э. д. с. в коммутируемых секциях примерно вдвое меньше, чем при диаметральном шаге. Противоположные щетки соединяют секции, лежащие в разных пазах, поэтому взаимная индуктивность между этими секциями отсутствует. Кроме того, поскольку лобовые части обмотки якоря при полудиаметральном шаге примерно в 2 раза короче, чем при диаметральном,

то и самоиндукция таких секций будет меньше. Благодаря хорошим условиям коммутации дополнительные полюсы в ЭМУ с полудиаметральным шагом мощностью до 5 *квт*, как правило, не ставятся.

В обычных ЭМУ поперечного поля с диаметральным шагом применяются электрографитированные щетки, имеющие большое переходное сопротивление и обладающие хорошими коммутационными свойствами. Применение их в короткозамкнутой цепи снижает раз-

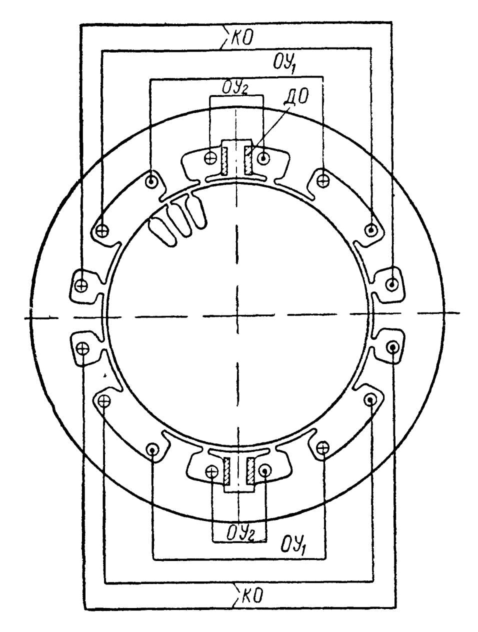


Рис. 28. Магнитопровод статора и расположение в нем обмоток ЭМУ с полудиаметральным шагом обмотки якоря и насыщенным участком магнитной цепи.

$ОУ_1$, $ОУ_2$—обмотки управления; *КО*—компенсационная обмотка; *ДО*—демпферная обмотка.

магничивающее действие коммутационных токов и обеспечивает хорошую коммутацию при отсутствии дополнительных полюсов по поперечной оси машины. Однако переходное сопротивление при применении электрографитированных щеток нестабильно, особенно при малых плотностях тока, и зависит от многих факторов (состояние коллектора, температура окружающей среды, нажатие на щетки и др.). Поэтому ЭМУ поперечного поля с диаметральным шагом, как уже отмечалось выше, работают обычно в режиме небольшой недокомпенсации и со сдвигом щеток по направлению вращения якоря. Однако и при этом имеется некоторая нестабильность характеристик ЭМУ, особенно при малых токах управления. Устойчивая же работа ЭМУ с диаметральным шагом в режимах перекомпенсации и на пороге самовозбуждения практически невозможна

и, как правило, не применяется. Установка медно-графитных щеток, имеющих малое переходное сопротивление, в короткозамкнутой цепи приводит к резкому увеличению размагничивающего действия коммутационных токов и ухудшению коммутации (повышенному искрению).

Иначе обстоит дело в ЭМУ с полудиаметральным шагом. Условия коммутации щеток короткозамкнутой цепи у них значительно лучше, а размагничивающее действие коммутационных токов меньше. Поэтому в ЭМУ с полудиаметральным шагом в короткозамкнутой цепи могут применяться медно-графитные щетки. Обладая низким переходным сопротивлением, эти щетки при хороших условиях коммутации обеспечивают стабильный щеточный контакт и тем самым более устойчивую работу ЭМУ, особенно при малых плотностях тока. Для улучшения коммутационных свойств и уменьшения размагничивающего эффекта щетки рекомендуется делать разрезными.

Поскольку ЭМУ поперечного поля — машина нереверсивная, в ней имеется возможность применять реактивные щетки, обеспечивающие хорошее прилегание их к коллектору. Щетки в щеткодержателях должны иметь минимальный люфт (обычно зазор между щеткой и щеткодержателем не должен превышать 0,1 *мм*). Нажатие на все щетки, расположенные на одном щеточном болту, должно быть равномерное и одинаковое. При всех этих условиях, а также при правильной притирке и установке щеток относительно нейтрали можно получить стабильную работу ЭМУ с полудиаметральным шагом в режиме перекомпенсации или при сдвиге щеток против направления вращения при самовозбуждении или на пороге самовозбуждения. Щетки в цепи нагрузки устанавливаются электрографитированные, обладающие высоким переходным сопротивлением и хорошо работающие в условиях самой затрудненной коммутации.

ЭМУ с полудиаметральным шагом имеют примерно такой же коэффициент усиления, как и ЭМУ с диаметральным шагом, хотя у первых только половина активных витков якоря создает основной рабочий поток. Это объясняется следующими причинами: 1) активное сопротивление обмотки якоря при полудиаметральном шаге примерно на 30—35% меньше, чем при диаметральном шаге, за счет более коротких лобовых частей; уменьшается также длина, а следовательно и сопротивление витков обмоток управления; 2) размагничивающее действие коммутационных токов в ЭМУ с полудиаметральным шагом в 2—2,5 раза меньше, чем у ЭМУ с диаметральным шагом; 3) поскольку сопротивление обмотки якоря при полудиаметральном шаге меньше, по условиям нагрева ток нагрузки может быть соответственно увеличен.

Таким образом, хотя мощность ЭМУ поперечного поля с полудиаметральным шагом обмотки якоря меньше мощности, соответствующей машине с диаметральным шагом, примерно на 30%, однако коэффициент усиления обеих машин примерно одинаковый. При работе же ЭМУ с полудиаметральным шагом в режиме перекомпенсации коэффициент усиления может быть значительно выше.

Быстродействие ЭМУ с полудиаметральным шагом выше, чем у соответствующего ЭМУ с диаметральным шагом, так как постоянная времени обмотки якоря последнего значительно больше. Это объясняется тем, что, как видно из распределения тока в обмотке

якоря (рис. 25), взаимная индуктивность проводников, лежащих в одном пазу, у половинного числа витков равна нулю, поскольку токи в проводниках нижнего и верхнего слоев направлены встречно.

Характеристики ЭМУ с полудиаметральным шагом без нелинейного элемента имеют такой же вид, как и у обычных ЭМУ поперечного поля.

Особый интерес представляет ЭМУ с полудиаметральным шагом и с внутренним нелинейным элементом в виде насыщенного участка магнитной цепи.

В таком ЭМУ обмотки управления, одна из которых расположена на вставных зубцах, а другая охватывает продольные полюсы (рис. 28), включаются так, чтобы их н. с. действовали встречно.

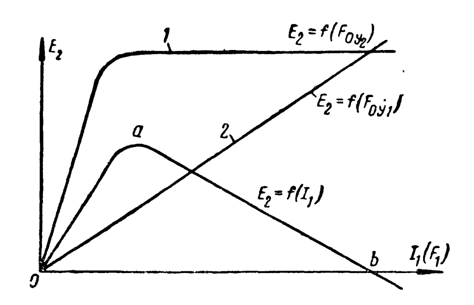


Рис. 29. Характеристика холостого хода первой ступени ЭМУ с насыщенным участком магнитной цепи.

На рис. 29 показаны характеристики холостого хода первой ступени ЭМУ от н. с. каждой из обмоток управления и результирующая кривая от суммы н. с. обоих обмоток управления. Обмотка управления $ОУ_2$ быстро насыщает вставные зубцы (кривая *1*), при этом остальная часть магнитопровода остается ненасыщенной. Обмотка управления $ОУ_1$ машину не насыщает (кривая *2*), и характеристика прямолинейна.

При включении обмоток управления встречно э. д. с. E_2 с увеличением тока управления I_1 сначала увеличивается до максимума, а затем падает до нуля в точке, где н. с. обмоток управления равны.

Такая характеристика, как будет показано в дальнейшем, позволяет использовать ЭМУ с полудиаметральным шагом в качестве возбудителя — регулятора. При этом рабочим участком суммарной кривой холостого хода является падающая часть характеристики (*ab*, рис. 29). ЭМУ работает при самовозбуждении от компенсационной обмотки, настроенной на соответствующую перекомпенсацию.

Благодаря наличию насыщенных участков магнитной цепи и демпферной обмотке в виде короткозамкнутых медных витков большого сечения, охватывающих вставные зубцы, постоянная времени цепи управления мала, а быстродействие ЭМУ велико.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМУ

10. ЭМУ КАК ЭЛЕМЕНТ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Современный автоматизированный электропривод требует высокой точности регулирования, высокого быстродействия, устойчивости и надежности в работе.

Широкое применение ЭМУ в системах автоматического регулирования обусловлено не только их высоким коэффициентом усиления и быстродействием, но и рядом других преимуществ по сравнению с различными видами усилителей.

Существенным преимуществом ЭМУ является их способность легко обеспечивать изменение полярности на выходе при изменении полярности на входе машин. Электронные, магнитные, полупроводниковые усилители зависят от выпрямительных устройств, и изменение полярности осуществляется в основном путем дублирования схем включения. Таким образом, если в системе регулирования требуется, например, обеспечить реверсирование исполнительного двигателя, то при применении электромашинного усилителя потребуется один ЭМУ, а при применении магнитных усилителей — два комплекта магнитных усилителей и выпрямительных устройств. Другим важным преимуществом ЭМУ является их высокая перегрузочная способность.

Обычно ЭМУ поперечного поля допускают, как правило, 2—3-кратные кратковременные перегрузки по току нагрузки при номинальном напряжении и 3—5-кратные форсировки по току управления.

В последнее время магнитные и полупроводниковые усилители начали вытеснять ЭМУ из ряда систем автоматизированного электропривода. Это объясняется прежде всего большей надежностью статических усилителей по сравнению с вращающимися. Применяя современные материалы и конструкции, можно получить статические усилители с высокими экономическими параметрами и усилительными свойствами.

Однако, несмотря на это, в целом ряде автоматизированных электроприводов, особенно в мощных системах и там, где требуются реверсирование и высокая перегрузочная способность, применение ЭМУ остается предпочтительным.

Из всех видов ЭМУ наиболее широкое распространение как в отечественной, так и в зарубежной технике получили ЭМУ поперечного поля, обладающие лучшей добротностью и технико-экономическими показателями, чем другие виды ЭМУ.

Серийно ЭМУ поперечного поля выпускаются мощностью примерно до 20 *квт*. При проектировании на большие мощности в ЭМУ поперечного поля возникают большие трудности, связанные с обеспечением хорошей коммутации поперечных щеток.

В последние годы спроектированы и изготовлены отдельные образцы крупных ЭМУ поперечного поля мощностью до 100 *квт*, обладающие хорошими показателями. На такие мощности ЭМУ поперечного поля изготавливаются в многополюсном исполнении с мощной поперечной подмагничивающей обмоткой и иногда с до-

полнительными полюсами по поперечной оси. ЭМУ продольного поля можно изготовить на базе обычных серийных машин постоянного тока; для этого зачастую можно воспользоваться той же технологической оснасткой. Кроме того, по условиям коммутации они могут изготавливаться на те же мощности, что и обычные машины постоянного тока. Все это и обусловливает применение ЭМУ продольного поля во многих системах автоматического регулирования, особенно там, где требуется усилитель в несколько десятков киловатт.

Следует отметить также, что в зарубежной технике применение того или иного вида ЭМУ продиктовано часто не техническими соображениями, а патентными.

ЭМУ применяются в самых различных автоматизированных электроприводах. Они могут быть использованы в качестве возбудителей генераторов в системах автоматического регулирования их напряжения, в качестве возбудителей электродвигателей в системах автоматического регулирования их скорости, в следящих системах в качестве силовых генераторов, в качестве возбудителей в системах форсировки возбуждения генератора или форсировки пуска и торможения двигателей и т. д.

В отечественной технике ЭМУ широко применяются в металлургической промышленности для привода прокатных станов и вспомогательных механизмов, в станкостроении для электропривода различных металлорежущих станков, в приводе бумагоделательных агрегатов, в самолетных электроприводах, в приводе гребных двигателей и во многих других системах регулирования.

ЭМУ могут применяться как в разомкнутых (без внешних обратных связей), так и в замкнутых системах регулирования. Последние, как известно, называются системами автоматического регулирования (САР), и в них могут быть использованы жесткие (действующие при установившихся и переходных процессах) и гибкие (действующие только при переходных процессах) обратные связи.

Если для анализа статических режимов важнейшую роль играет коэффициент усиления, т. е. отношение выходной регулируемой величины к входной задающей величине при установившихся процессах, то при анализе переходных процессов САР важнейшую роль играет так называемая передаточная функция. В теории регулирования передаточной функцией называют отношение в операторной форме изображения выходной регулируемой величины к изображению входной задающей величины.

Передаточную функцию можно получить как для всей системы, так и для отдельных ее элементов.

Для ЭМУ выходной регулируемой величиной является обычно напряжение на выходе, а входной задающей — напряжение на обмотке управления.

Передаточную функцию для того или иного вида ЭМУ можно легко получить из анализа переходных процессов.

Для независимого ЭМУ из уравнения (17)

$$k_{(p)} = \frac{E_2}{U_1} = \frac{k_u}{1 + pT_1}. \quad (79)$$

где k_u — коэффициент усиления по напряжению.

Аналогичное выражение передаточной функции получается и для ЭМУ с самовозбуждением:

$$k_{(p)} = \frac{k_u}{1 + pT_э}, \tag{80}$$

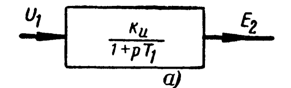
где $T_э$ — эквивалентная постоянная времени обмоток управления и самовозбуждения (25).

Закон изменения напряжения на выходе в этих случаях апериодический по простой экспоненте. ЭМУ здесь может быть представлен одним апериодическим звеном рис. 30,*а*.

Для двухмашинного ЭМУ из уравнения (32)

$$k_{(p)} = \frac{k_{u1}k_{u2}}{(1 + pT_1)(1 + pT_2)}, \tag{81}$$

где k_{u1}, k_{u2} — коэффициенты усиления по напряжению первой и второй ступеней.



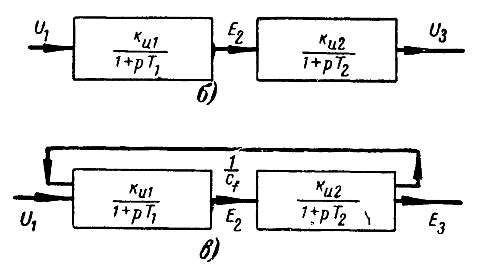


Рис. 30. ЭМУ как звено системы автоматического регулирования.

а — одноступенчатый ЭМУ; *б* — двухступенчатый ЭМУ; *в* — ЭМУ поперечного поля с учетом реакции тока короткозамкнутой цепи.

В этом случае ЭМУ может быть представлен двумя апериодическими звеньями рис. 30,*б*.

Для ЭМУ поперечного поля без учета реакции тока поперечной цепи передаточная функция будет точно такой же, как и для двухмашинного ЭМУ (81). При учете реакции тока поперечной цепи после простых преобразований уравнения (67) можно получить следующее выражение для передаточной функции:

$$k_{(p)} = \frac{k_{u1}k_{u2}}{c_f} \cdot \frac{1}{T_1T_2'p^2 + \left(T_1 + T_2' \pm \frac{k_1M_{12}}{R_1R_q}\right)p + 1}, \tag{82}$$

где c_f — коэффициент, учитывающий реакцию тока по поперечной оси.

Учитывая, что $k_u = \frac{k_{u1} k_{u2}}{c_f}$ — реальный коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля по напряжению и пренебрегая $\frac{k_1 M_{12}}{R_1 R_q}$ как величиной сравнительно очень малой, получим:

$$k_{(p)} = \frac{k_u}{T_1 T_2' p^2 + (T_1 + T_2') p + 1} = \frac{k_u}{(1 + pT_1)(1 + pT_2')}. \quad (83)$$

Уравнение (83) обычно используется при расчетах переходных процессов систем автоматического регулирования с ЭМУ поперечного поля.

Как уже указывалось в гл. 2 [уравнение (71)], в зависимости от соотношения постоянных времени и величины реакции тока поперечной цепи переходный процесс может быть как апериодическим, так и колебательным.

В соответствии с этим ЭМУ поперечного поля можно представить как два последовательно включенных апериодических звена или как колебательное звено. Реакция тока поперечной цепи действует как жесткая внутренняя отрицательная обратная связь (рис. 30,*в*).

Если подать на вход ЭМУ сигнал синусоидальной формы с частотой ω и амплитудой, равной единице, на выходе ЭМУ получится в установившемся режиме гармоническое колебание с той же частотой, но с другими амплитудой и фазой, зависящими от постоянных времени машины и частоты переменного тока. Такую характеристику называют амплитудно-фазовой, ее уравнение можно получить, если в передаточной функции заменить оператор p через $j\omega$.

Для одноступенчатых ЭМУ выражение для амплитудно-фазовой характеристики будет:

$$k(j\omega) = \frac{k}{1 + Tj\omega}. \quad (84)$$

Для двухступенчатого ЭМУ

$$k(j\omega) = \frac{k_{u1} k_{u2}}{(1 + T_1 j\omega)(1 + T_2 j\omega)}. \quad (85)$$

Амплитудно-фазовой частотной характеристикой ЭМУ называют характеристику, полученную на выходе ЭМУ при подаче на его вход сигналов синусоидальной формы с различными частотами, амплитудой, равной единице, и сдвигом по фазе, равным нулю. Амплитудно-фазовую частотную характеристику принято изображать годографом вектора $k(j\omega)$ на комплексной плоскости. На рис. 31 показан годограф амплитудно-фазовой частотной характеристики двухступенчатого ЭМУ.

Амплитудно-фазовая характеристика играет важную роль при анализе устойчивости систем автоматического регулирования во время переходных процессов.

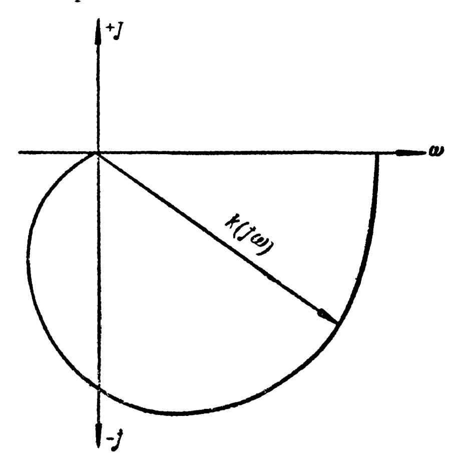


Рис. 31. Годограф амплитудно-фазовой характеристики ЭМУ поперечного поля.

По амплитудно-фазовой характеристике разомкнутой системы можно судить об устойчивости системы автоматического регулирования по так называемому критерию Найквиста — Михайлова.

11. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

В схемах автоматического поддержания напряжения генератора при изменениях его нагрузки ЭМУ может быть использован в качестве возбудителя — регулятора.

На рис. 32 показана принципиальная схема поддержания напряжения генератора постоянного тока с помощью ЭМУ поперечного поля.

На выход ЭМУ включена обмотка возбуждения генератора *ОВ*. Одна из обмоток управления $ОУ_1$ питается от постоянного напряжения U_1, вторая обмотка $ОУ_2$ подключена к напряжению регулируемого генератора. Намагничивающие силы обмоток управления F_1 и F_2 направлены навстречу друг другу. ЭМУ будет возбуждаться от разности потоков, созданных этими н. с. Если напряжение генератора $U_г$ почему-либо уменьшится, например с увеличением нагрузки, то сразу же уменьшится н. с. F_2, увеличится разность потоков управления, а вместе с ней напряжение на выходе ЭМУ, ток возбуждения генератора, а следовательно, и его напряжение.

Если напряжение генератора увеличится (сброс нагрузки), то разность потоков управления будет уменьшаться, а вместе с этим уменьшится напряжение генератора.

В этой схеме обмотка $ОУ_2$ является обмоткой жесткой обратной связи, а обмотка управления $ОУ_1$ — задающей обмоткой.

Точность регулирования напряжения по приведенной схеме в значительной степени зависит от коэффициента усиления ЭМУ, а быстродействие — от его постоянных времени.

Недостатком схемы является необходимость наличия независимого источника постоянного тока, напряжение которого U_1 задает уровень регулирования и полярность напряжения на выходе генератора. Поэтому при поддержании напряжения генератора напряжение U_1 должно быть неизменным. Взаимоиндуктивность между

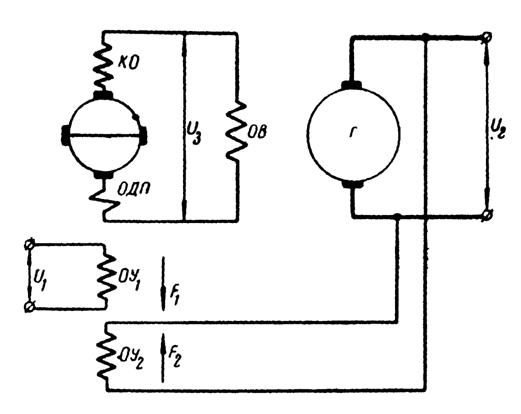


Рис. 32. Принципиальная схема регулирования напряжения генератора постоянного тока с помощью ЭМУ поперечного поля.

обмотками управления, расположенными в одних и тех же пазах, при переходных процессах большая, и это замедляет быстродействие схемы.

В качестве возбудителя — регулятора синхронных генераторов в зарубежной технике широко используется ЭМУ с полудиаметральным шагом обмотки якоря и насыщенным участком магнитной цепи. На рис. 33,*а* показана схема возбуждения—регулирования синхронного генератора с применением такого ЭМУ. Последовательно соединенные обмотки управления ЭМУ включаются через выпрямительный мост и регулировочное сопротивление R на фазовое напряжение синхронного генератора. Обмотка возбуждения синхронного генератора включается на выходное напряжение ЭМУ. Компенсационная обмотка КО, настроенная на перекомпенсацию, возбуждает ЭМУ до напряжения, необходимого для создания номинального тока в обмотке возбуждения синхроного генератора. Намагничивающие силы обмоток управления направлены встречно и при номинальном напряжении синхронного генератора взаимно компенсируются. Обмотка управления $ОУ_1$, расположенная на насыщенных зубцах, создает уровень регулирования напряжения ЭМУ (внутренний нелинейный элемент). При изменении напряжения на выходе синхронного генератора ток в цепи управления меняется, при этом нарушается равновесие н. с. обмоток управления. Поскольку э. д. с., наводимая в якоре обмоткой управления $ОУ_2$, при этом практически не изменяется, а э. д. с., наводимая обмоткой управления $ОУ_2$,

меняется по прямолинейному закону, на выходе ЭМУ появляется добавочная э. д. с. $e_д$ (рис. 33,*б*), изменяющая ток возбуждения синхронного генератора до восстановления прежнего значения его напряжения. Такая система лишена отмеченных выше недостатков предыдущей схемы и имеет высокую точность регулирования

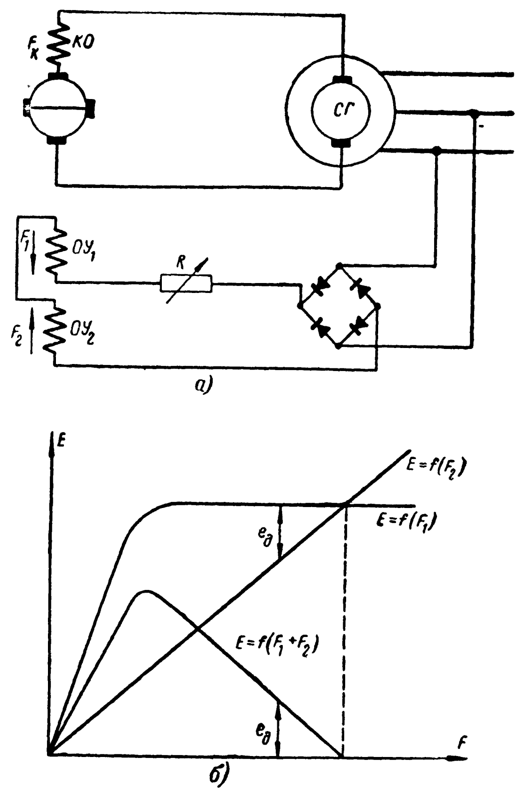


Рис. 33.
а — принципиальная схема регулирования напряжения синхронного генератора с помощью ЭМУ с полудиаметральным шагом и внутренним нелинейным элементом; *б* — характеристика ЭМУ с насыщенным участком магнитной цепи.

и быстродействие. Питание обмоток управления выпрямленным пульсирующим током значительно уменьшает влияние гистерезиса на характеристики машины.

Экспериментальное исследование синхронного генератора 10 *квт*, 220 *в*, $\cos\varphi=0{,}8$, 1 500 *об/мин*, 50 *гц* с ЭМУ с насыщенным участком магнитной цепи в качестве возбудителя-регулятора показало, что напряжение генератора при изменении нагрузки от холостого

хода до номинальной поддерживалось с точностью ±2%. При этом время установления напряжения было 0,12 *сек.*

ЭМУ с полудиаметральным шагом без насыщенного участка магнитной цепи могут быть также использованы в качестве возбудителей-регуляторов синхронных генераторов. В этом случае роль нелинейного элемента выполняет нелинейное сопротивление (тиритовое или другое, подобное ему по свойствам) $R_т$, включенное параллельно с одной из обмоток управления (рис. 34,*а*).

Величина нелинейного сопротивления меняется приблизительно пропорционально кубу приложенного к нему напряжения, и, таким

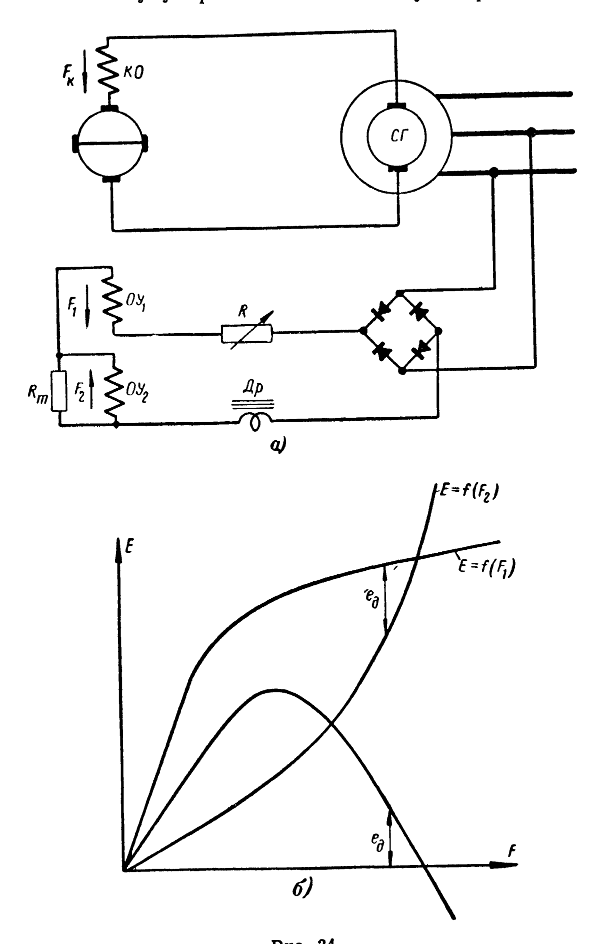


Рис. 34.
а — принципиальная схема регулирования напряжения синхронного генератора с помощью ЭМУ с полудиаметральным шагом и вынесенным нелинейным элементом; *б* — характеристика ЭМУ с вынесенным нелинейным элементом.

образом, если напряжение растет, то величина сопротивления падает значительно быстрее.

ЭМУ с вынесенным нелинейным элементом в качестве возбудителей-регуляторов работает в схеме принципиально такой же, как и при применении ЭМУ с насыщенным участком магнитной цепи. Компенсационная обмотка настраивается на перекомпенсацию, а н. с. обмоток управления направлены навстречу.

Характеристики холостого хода такой машины показаны на рис. 34,*б*. Они имеют примерно такой же вид, как и с внутренними нелинейными элементами.

Быстродействие и устойчивость такой системы регулирования хуже, чем при применении насыщенного участка магнитной цепи.

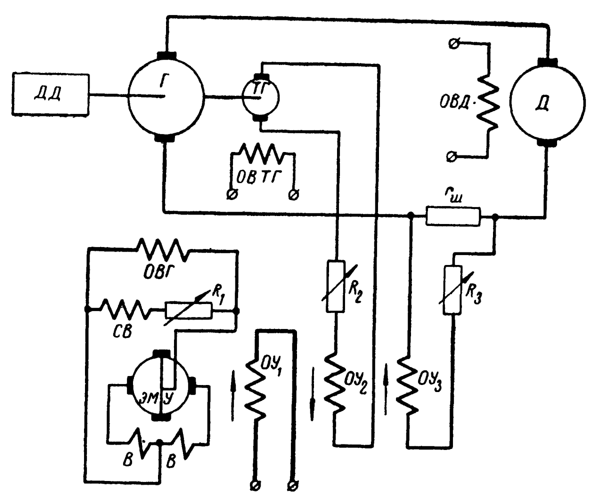


Рис. 35. Принципиальная схема регулирования напряжения генератора постоянного тока с помощью трехступенчатого ЭМУ продольного поля.

Это объясняется большой взаимоиндукцией обмоток управления, расположенных в одних и тех же пазах. Поэтому для большей устойчивости в системах регулирования, где применяется ЭМУ с вынесенным нелинейным элементом, обычно устанавливается успокоитель в виде дросселя насыщения *Др* (рис. 33,*а*) или трансформатора с подпиткой. Поэтому ЭМУ с вынесенным нелинейным элементом применяются значительно реже, чем ЭМУ с насыщенным участком магнитной цепи.

ЭМУ с полудиаметральным шагом и насыщенным участком магнитной цепи применяются в качестве возбудителей-регуляторов синхронных генераторов мощностью до 220 *ква*.

На рис. 35 показана схема регулирования напряжения генератора постоянного тока с помощью трехступенчатого ЭМУ продольного поля с обмоткой самовозбуждения. Генератор *Г* приводится во вращение дизельным двигателем *ДД*, генератор питает двигатель *Д*, связанный с рабочим механизмом.

ЭМУ снабжен тремя обмотками управления: $ОУ_1$ — задающий; $ОУ_2$ — питаемой от вспомогательного генератора постоянного тока *ТГ* и $ОУ_3$ — от падения напряжения на сопротивлении $r_ш$, включенном последовательно в цепь ротора двигателя и генератора.

Обратная связь по скорости осуществляется с помощью небольшого генератора постоянного тока с независимым возбуждением (обмотка *ОВТГ*). Напряжение его пропорционально скорости вращения главного генератора, поскольку они расположены на одном валу. Такие небольшие генераторы, осуществляющие обратную связь по скорости, принято называть тахогенераторами.

Трехступенчатый ЭМУ продольного поля с обмотками возбуждения *В* и параллельного самовозбуждения *СВ* питает обмотку возбуждения генератора *ОВГ*. Двигатель *Д* имеет независимое возбуждение *ОВД*. С помощью регулировочных сопротивлений R_1, R_2, R_3 ЭМУ настраивается таким образом, что при номинальных скоростях вращения и нагрузки обеспечивается заданное напряжение. При уменьшении по какой-либо причине скорости вращения дизельного двигателя уменьшится также напряжение главного генератора и тахогенератора, а вместе с ним и ток через обмотку управления $ОУ_2$. Поскольку н. с. обмотки $ОУ_2$ направлена против н. с. задающей обмотки $ОУ_1$, увеличится напряжение ЭМУ, а следовательно, и генератора *Г*. При увеличении нагрузки уменьшится напряжение генератора, однако падение напряжения на сопротивлении $r_ш$ увеличится, что приведет к увеличению тока через обмотку управления $ОУ_3$, н. с. которой совпадает с н. с. задающей обмотки $ОУ_1$. Следовательно, увеличится напряжение ЭМУ, а напряжение генератора восстановится до величины, близкой к номинальной.

Таким образом, схема на рис. 35 обеспечивает поддержание напряжения как при изменении скорости вращения приводного двигателя, так и при изменении нагрузки.

12. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

В схемах регулирования генератор — двигатель (ГД) ЭМУ нашли широкое применение как в качестве возбудителей, так и в качестве самих генераторов.

Для очень многих механизмов требуется, чтобы скорость двигателя при изменениях нагрузки оставалась постоянной. Уменьшение скорости двигателей мелаллорежущих станков, прокатных станов, насосов и др. с увеличением нагрузки может привести к снижению их производительности. Существует большое количество схем поддержания неизменной скорости двигателей с применением ЭМУ.

На рис. 36 показана схема регулирования двигателя, в которой ЭМУ используется в качестве возбудителя главного генератора. Жесткая обратная связь по скорости осуществляется с помощью тахогенератора. Обмотки возбуждения главного двигателя *ВД* и тахогенератора *ВТГ* включены на сеть постоянного напряжения, к сети также подключена через регулируемое сопротивление обмотка управления $ОУ_1$, задающая уровень регулирования скорости двигателя.

Вторая обмотка управления $ОУ_2$ включена на напряжение тахогенератора и создает н. с. F_2, направленную встречно н. с. F_1 обмотки $ОУ_1$.

Разность н. с. обмоток управления создает напряжение на выходе ЭМУ, включенного на обмотку возбуждения генератора *Г*, и определяет его напряжение. Скорость двигателя *Д* зависит от напряжения генератора.

Таким образом, с помощью реостата *R* в цепи обмотки управления можно задать требуемую скорость двигателя и соответствующие ей напряжения генератора, ЭМУ и тахогенератора. Если по какой-либо причине скорость снизится, например при включении нагрузки, то уменьшится и напряжение тахогенератора, а вместе с ним увели-

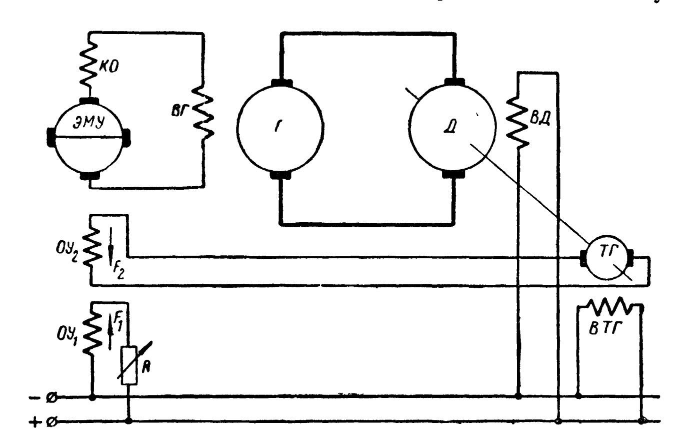


Рис. 36. Принципиальная схема регулирования скорости двигателя с помощью ЭМУ поперечного поля.

чится разность н. с. обмоток управления ЭМУ. Это приведет к повышению напряжения ЭМУ и генератора и скорости двигателя, которая вновь достигнет примерно первоначального значения.

При увеличении скорости двигателя от уменьшения нагрузки напряжение тахогенератора увеличится, а вместе с ним уменьшится разность н. с. управления, напряжение ЭМУ и генератора, скорость двигателя при этом уменьшится до заданного значения.

Таким образом, с помощью ЭМУ и обратной связи по скорости двигателя, осуществляемой посредством тахогенератора, можно с большой точностью поддерживать постоянным напряжение главного генератора, а следовательно, и скорость двигателя.

На рис. 37 показана схема поддержания скорости двигателя при работе ЭМУ непосредственно на обмотку возбуждения двигателя. В данной схеме для осуществления обратной связи по скорости также используется тахогенератор. Напряжение ЭМУ складывается или вычитается из напряжения генератора в зависимости от полярности на выходе ЭМУ. При номинальной скорости двигателя напряжение ЭМУ равно нулю, н. с. обмоток управления, направленные встречно, взаимно уравновешиваются.

При изменении скорости двигателя увеличится или уменьшится напряжение тахогенератора, нарушится равновесие намагничивающих сил и на выходе ЭМУ появится напряжение, которое в свою

очередь изменит ток через обмотку возбуждения двигателя. Скорость двигателя восстановится до величины близкой к номинальной.

Существует ряд схем регулирования скорости двигателя и без применения тахогенератора. В этих случаях одна или несколько обмоток управления включаются на падение напряжения в сопротивлении включенном в цепь якоря главного двигателя (таким образом, напряжение на них пропорционально току нагрузки двигателя) и на напряжение на якоре двигателя.

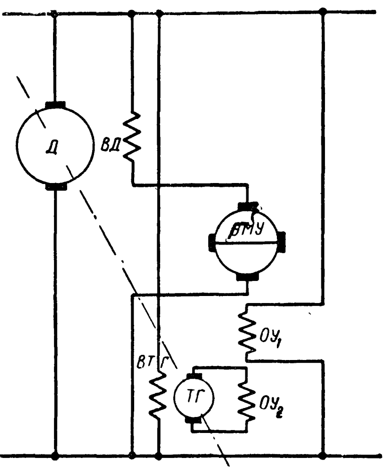


Рис. 37. Прунципиальная схема регулирования скорости двигателя постоянного тока с помощью ЭМУ поперечного поля.

Часто для осуществления быстрого пуска крупных двигателей в системе ГД требуется применить форсировку возбуждения главного генератора. На рис. 38,*а* показана принципиальная схема форсировки пуска и регулирования скорости электродвигателя с помощью двухмашинного усилителя, состоящего из двух генераторов P_1 и P_2.

Генератор первой ступени P_1 имеет две обмотки управления $ОУ_1$ и $ОУ_2$. Обмотка $ОУ_1$ питается от независимого источника тока, обмотка $ОУ_2$ — током, пропорциональным выходному напряжению главного го генератора. Намагничивающие силы обмоток управления $ОУ_1$ и $ОУ_2$ направлены встречно.

В начале процесса пуска ток подается в обмотку $ОУ_1$, н. с. которой F_1 велика и обеспечивает сильное насыщение ЭМУ. На выходе первой ступени, а затем, следовательно, и второй ступени (генератор P_2) создается форсировочное напряжение $E_{макс}$, которое в 2—3 раза превосходит номинальное напряжение $E_н$. При такой значительной форсировке быстро возбуждается главный генератор и двигатель сразу набирает скорость. По мере нарастания напряжения увеличивается н. с. F_2 обмотки управления $ОУ_2$, включенной на напряжение главного генератора. Быстрое насыщение первой ступени ЭМУ обеспечивается специальным устройством магнитной системы генератора первой ступени (на полюсах возбуждения имеются вырезы). При такой конструкции полюсов вследствие быстрого насыщения «магнитных мостиков» магнитная характеристика изгибается при малых токах возбуждения (рис. 38,*б*). Намагничивающая сила F_1 во много раз больше (в 20—30 раз) номинальной н. с. F_1—F_2. Это обеспечивает во всем процессе пуска двигателя высокое форсировочное напряжение ЭМУ, а следовательно, хорошее быстродействие всей системы возбуждения. До тех пор, пока напряжение главного генератора не достигнет значения, близкого к номинальному, н. с. F_2 будет недостаточной для того, чтобы изменить напряжение сильно насыщенной первой ступени. При номинальном напряжении генератора н. с. F_2 достигнет достаточно большой величины

и напряжение ЭМУ быстро уменьшится до номинального значения $E_н$.

Если необходимо остановить главный двигатель, обмотка $ОУ_1$ отключается и достаточно большая н. с. F_2 изменяет полярность ЭМУ до напряжения $-E_{макс}$, после чего главный генератор быстро

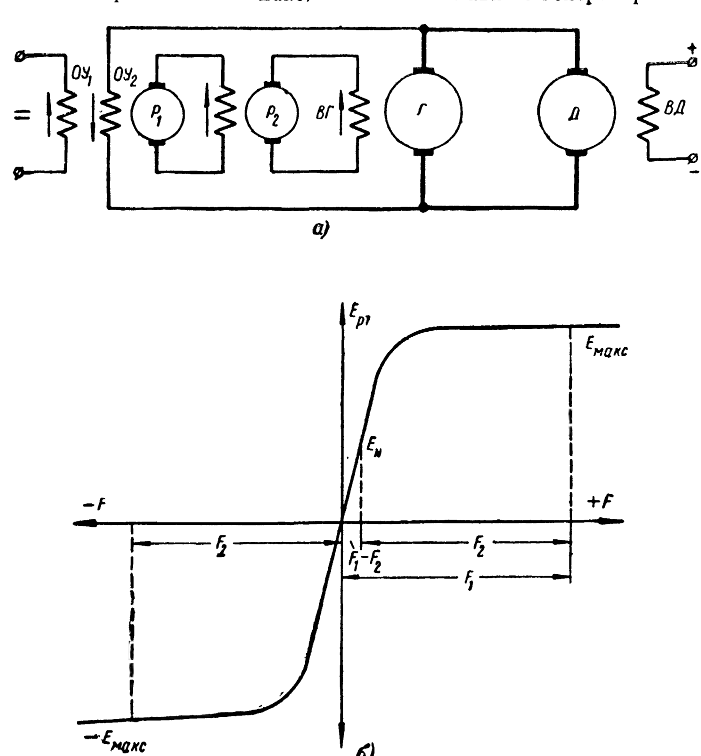


Рис. 38.
а — схема форсировки пуска двигателя постоянного тока с помощью двухмашинного ЭМУ (регулекс); б — характеристика холостого хода двухмашинного ЭМУ (регулекс).

развозбуждается. Для изменения направления вращения главного двигателя достаточно изменить полярность питания обмотки $ОУ_1$.

Таким образом, при помощи двухмашинного ЭМУ можно управлять мощным реверсивным приводом, обеспечив быстрое протекание пуска и торможения путем большой и постоянной форсировки возбуждения.

Однако скорость главного двигателя в этой схеме поддерживается постоянной только при небольших изменениях нагрузки.

Описанный двухмашинный усилитель под названием «Регулекс» был впервые применен английской фирмой Аллис-Чалмерс (Allis-

Chalmers) для системы возбуждения ГД привода мощных прокатных станов.

В отличие от двухмашинного усилителя типа «рапидин» регулекс имеет насыщенную первую ступень и ненасыщенную вторую и поэтому по своим весовым показателям значительно уступает рапидину.

13. ЭМУ В СЛЕДЯЩЕМ ПРИВОДЕ

Следящие системы представляют собой разновидность замкнутых систем автоматического регулирования. В следящем приводе регулируемая величина изменяется соответственно с изменениями управляющего маломощного сигнала, причем эти изменения могут происходить по любому закону.

Регулируемой величиной является обычно угол поворота вала управляемого механизма от начального положения, управляющей величиной — угол поворота вала задающего прибора от положения, выбранного за начало отсчета. Действие следящей системы зависит от разности между действительным положением регулируемого объекта и его положением, которое необходимо получить в процессе регулирования. Следящая система стремится уменьшить эту разность.

В настоящее время следящие системы используются для управления металлорежущими станками, для дистанционного управления положением клапанов, в рулевых управлениях кораблей, в автопилотах, в управлении положением орудий и радарных установок, в вычислительных устройствах и т. д. ЭМУ обычно применяются в так называемых силовых следящих системах непрерывного действия, используемых для непосредственного автоматического управления сравнительно мощными механизмами. Обычно в таких системах ЭМУ используется в качестве не только усилителя, но и одновременно силового генератора, непосредственно приводящего в движение исполнительный двигатель.

На рис. 39 показана принципиальная схема простейшей следящей системы с ЭМУ.

Ротор задающего сельсина *СЗ* питается от сети переменного тока. Обмотки статоров задающего сельсина и сельсина-приемника соединены между собой. Ротор сельсина приемника *СП* через выходной трансформатор *ТВ* подключен к фазочувствительному электронному усилителю *ЭУ*, который включен на две одинаковые обмотки управления ЭМУ, н. с. которых направлены встречно. ЭМУ приводит во вращение исполнительный двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Двигатель через редуктор *Р* с понижающим передаточным отношением i соединен с сельсином-приемником *СП* и с регулируемым механизмом *РМ*.

Напряжение на обмотке ротора сельсина приемника зависит от угла рассогласования управляемого (исполнительного механизма) и задающего (сельсина-датчика) валов. При отсутствии рассогласования это напряжение равно нулю, а следовательно, токи в обмотках управления ЭМУ равны и ЭМУ не возбужден, исполнительный двигатель не вращается. При повороте задающего вала возникает напряжение в обмотке ротора сельсина-приемника, нарушается равновесие токов в обмотках управления, на выходе ЭМУ появляется напряжение. Исполнительный двигатель начинает вращаться. Дви-

гатель поворачивает регулируемый механизм так, чтобы угол рассогласования уменьшился. Направление вращения вала исполнительного двигателя определяется направлением поворота вала задающего сельсина, что обеспечивается с помощью фазочувствительного электронного усилителя. Чем больше угол рассогласования, тем больше напряжение на выходе усилителя, а следовательно, и скорость исполнительного двигателя. При совпадении положений валов напряжение ЭМУ равно нулю и исполнительный двигатель останавливается.

Таким образом, система как бы «следит» за изменением управляющего сигнала. Чем быстрее вал управляемого механизма достигает положения согласования, тем система лучше.

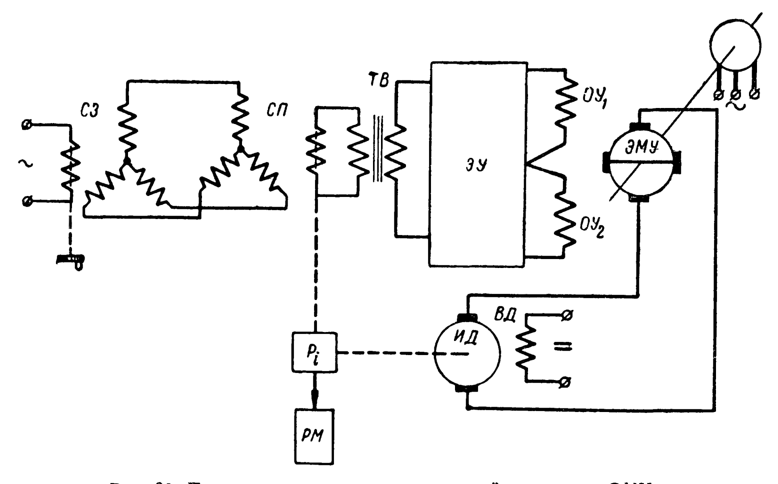


Рис. 39. Принципиальная схема следящей системы с ЭМУ.

Поскольку обычно в системах много как апериодических, так и колебательных звеньев, то в ней возникают качания, которые могут быть как затухающими, так и незатухающими.

Стабилизация системы достигается введением дополнительных отрицательных обратных связей. Используются гибкие и жесткие обратные связи. Наиболее часто используются гибкие обратные связи по напряжению ЭМУ, по напряжению тахогенератора, установленного на исполнительном двигателе, по падению напряжения в компенсационной обмотке ЭМУ и др. Применение обратных связей обеспечивает быструю стабилизацию следящих систем. Современные следящие системы обладают высокой точностью и быстродействием.

В следящих системах ЭМУ, как правило, работает в переходных процессах с большими кратковременными ударными перегрузками по току и напряжению. Поэтому, выбирая ЭМУ для следящих систем, следует ориентироваться на максимально допустимые перегрузки по току и напряжению, при этом средний ток в процессе работы системы должен быть близким к номинальному току ЭМУ. Это обеспечит допустимый нагрев машины в процессе регулирования.

Таким образом, требование обеспечения надежности в работе при больших перегрузках является для ЭМУ важнейшим. Это достигается при проектировании ЭМУ выбором достаточно высокого потолочного напряжения, некоторым запасом по плотности тока через щетки, надежным креплением и цементацией обмотки якоря, в которой при ударных нагрузках могут возникнуть большие динамические усилия, и рядом других мероприятий. Применение, например, водоэмульсионного лака 321т, обладающего высокой цементирующей способностью, для пропитки обмотки якорей ЭМУ вместо ранее применявшегося асфальтобитумного лака 447 в несколько раз повысило надежность работы ЭМУ в следящих системах.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

НАСТРОЙКА И ИСПЫТАНИЯ ЭМУ

14. ЩЕТОЧНЫЙ КОНТАКТ

Как уже отмечалось выше, состояние щеточного контакта, положение щеток относительно нейтрали для ЭМУ имеют важнейшее значение. Нарушение в щеточном контакте могут привести к значительному изменению параметров машины.

Конструкция щеточного аппарата должна обеспечивать стабильный щеточный контакт.

Продольные и поперечные щетки обычно располагают на общей траверсе, которую надежно укрепляют на подшипниковом щите. Часто применяют щеткодержатели так называемого «патронного» типа, которые запрессовываются непосредственно в коллекторный щит (рис. 19). Такие щеткодержатели удобны для обслуживания щеток; основной их недостаток заключается в том, что с износом щеток давление на них меняется, а регулировка давления пружины отсутствует.

В ЭМУ более, чем в других машинах, важно обеспечить равномерное нажатие на всех щетках, расположенных на одном щеточном болте. Неравномерное нажатие может привести к неравномерному распределению тока, а следовательно, к перегрузке отдельных щеток и искрению. А это в свою очередь может привести к изменению переходного сопротивления щеточного контакта и изменению параметров ЭМУ.

При применении электрографитированных щеток удельное нажатие на щетки должно быть примерно 300 *г/см²*.

Оказывает влияние на стабильность щеточного контакта также и люфт щеток в щеткодержателях, поэтому зазор между щеткой и щеткодержателем стараются выбрать минимальным (обычно около 0,1 *мм*).

Рекомендуется устанавливать также щетки и щеткодержатели реактивного типа, обеспечивающие надежное прилегание щеток к коллектору.

Повышенные требования должны быть предъявлены к качеству поверхности и биению коллектора особенно для высокоскоростных машин.

Биение коллектора при скорости якоря до 3 000 *об/мин* допу-

скается обычно не более 0,05 *мм*. Якорь ЭМУ тщательно динамически балансируется.

Особое внимание должно быть уделено притирке и пришлифовке щеток. От тщательности проведения этих операций в значительной степени зависит стабильность характеристик ЭМУ.

Предварительно притирку щеток производят на абразивном камне, имеющем такой же диаметр, как и коллектор. Притирку щеток на камне рекомендуется производить при установке их в том щите с траверсой и щеткодержателями, в котором эти щетки будут работать в машине. Затем щетки пришлифовываются непосредственно в машине до тех пор, пока пришлифованная часть щетки (зеркало) не составит примерно 80% всей ее рабочей поверхности, при этом непришлифованная часть щетки не должна располагаться вдоль всей длины щетки. Такая пришлифовка длится продолжительное время, обычно не менее 24 *ч*.

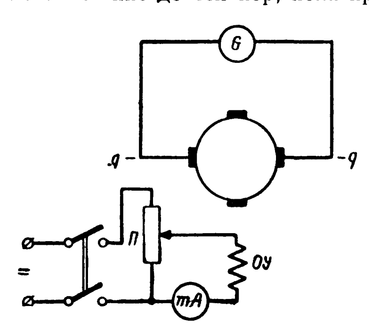


Рис. 40. Схема установки щеток в нейтраль ЭМУ поперечного поля. *МА* — миллиамперметр; *Г* — нульгальванометр; *П* — потенциометр.

После этого производится установка щеток в нейтраль, а затем вновь производится пришлифовка их к коллектору в течение примерно 2 *ч*.

Щетки и щеткодержатели, как правило, маркируются, с тем, чтобы при осмотре щеток, сборке или разборке ЭМУ устанавливать их только в свои щеткодержатели. Положение щеток в щеткодержателях должно быть также строго фиксировано. Щетки должны устанавливаться в щеткодержатели только при определенном положении (в направлении притирки).

Установку щеток ЭМУ в нейтраль обычно производят индуктивным методом.

При этом в ЭМУ поперечного поля короткозамкнутая цепь разрывается, а продольные щетки поднимаются. Установку щеток производят по минимальному отклонению нуль-гальвонометра, включенного на поперечные щетки, при включении или отключении тока в одной из обмоток управления и неподвижном якоре (рис. 40). Для большей точности установку щеток лучше производить при нескольких положениях якоря относительно статора. Величина тока управления должна быть близкой к номинальной. После установки щеток в нейтраль в ЭМУ поперечного поля их обычно сдвигают по направлению вращения якоря примерно на 1—2 *эл. град.*

При эксплуатации ЭМУ щеточный аппарат требует постоянных наблюдений.

Следует систематически следить за состоянием коллектора и щеток. Если в результате работы машины на краях коллекторных пластин появился подгар, его необходимо смыть тряпкой, смоченной чистым спиртом или чистым авиационным бензином. При значительном несмывающемся нагаре его разрешается снять микронной стеклянной бумагой. Следует также периодически прочищать дорожки между коллекторными пластинами.

При замене щеток во время эксплуатации притирка и пришлифовка их должны производиться по описанной выше методике. Необходимо вести наблюдения за давлением на щетки.

Допустимо искрение щеток обычно до 1,5 баллов по шкале ГОСТ 183-55.

15. НАСТРОЙКА КОМПЕНСАЦИИ

Настройка компенсации во многом определяет параметры на выходе ЭМУ. Компенсационная обмотка, как правило, рассчитывается на некоторую перекомпенсацию продольной реакции якоря. Для настройки компенсации параллельно компенсационной обмотке включается регулируемое шунтирующее сопротивление.

Ток в компенсационной обмотке будет:

$$I_{к} = I_{з} \frac{R_{ш}}{R_{к} + R_{ш}}, \tag{86}$$

где $R_{к}$ — сопротивление компенсационной обмотки;

$R_{ш}$ — сопротивление, шунтирующее компенсационную обмотку.

Намагничивающая сила компенсационной обмотки

$$F_{к} = w_{к} I_{з} \frac{R_{ш}}{R_{к} + R_{ш}}. \tag{87}$$

Величина шунтирующего сопротивления при полной компенсации ($F_{к} = F_{ad}$) из (47) и (87) будет:

$$R_{ш} = R_{к} \frac{1}{k_{w} - 1}, \tag{88}$$

где $k_{w} = \frac{w_{к}}{w_{a}}$ — отношение чисел эффективных витков компенсационной обмотки и обмотки якоря.

Обычно при проектировании выбирают $k_{w} = 1,03 \div 1,05$.

Для удобства регулирования шунтирующее сопротивление изготавливают из нихрома или константана в виде небольшого реостата, установленного в коробке выводов ЭМУ.

При нагревании машины величины сопротивления компенсационной обмотки и шунтирующего сопротивления изменяются поразному, и в связи с этим настройка компенсации может измениться. Поэтому в ряде случаев для уменьшения влияния нагрева на компенсацию шунтирующее сопротивление изготавливается из двух частей: одной нерегулируемой в виде катушки из медного провода и второй регулируемой. В случае изготовления шунтирующего сопротивления нерегулируемым настройка компенсации производится только на заводе-изготовителе.

Настройка компенсации производится после установки щеток относительно нейтрали при холодном состоянии машины, а затем проверяется в нагретом состоянии после контрольного номинального режима.

Настройку полной компенсации ЭМУ для получения характеристики естественной жесткости лучше всего производить по току в поперечной короткозамкнутой цепи.

Для этого в поперечную цепь включают амперметр (рис. 41) и при номинальном токе управления изменяют нагрузку. Шунтирующее сопротивление настраивают таким образом, чтобы при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной ток в короткозамкнутой поперечной цепи практически не изменялся. Это и будет соответствовать полной компенсации продольной реакции якоря.

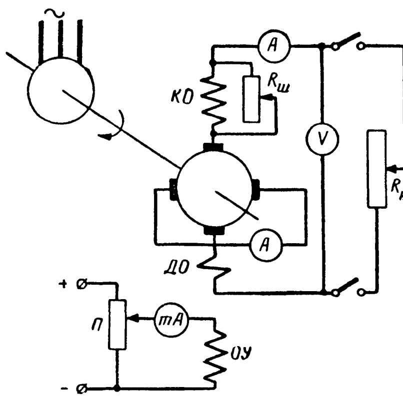


Рис. 41. Принципиальная схема настройки компенсации ЭМУ поперечного поля.

Чаще всего, как указывалось выше, ЭМУ поперечного поля настраивается на небольшую недокомпенсацию. Такую настройку можно производить по внешней характеристике при номинальном токе управления, задавая, в зависимости от требований систем регулирования, где будет применяться тот или иной ЭМУ, диапазон падения напряжения от холостого хода до номинальной или двойной нагрузки при неизменном номинальном токе управления. Иногда это делается при двух или нескольких значениях тока управления.

В ряде случаев настройка компенсации производится по току короткого замыкания при определенном значении тока управления. Во избежание влияния гистерезиса величина тока короткого замыкания фиксируется при обеих полярностях тока управления и настройка ведется по среднеарифметическому значению тока короткого замыкания.

Следует иметь в виду, что из-за нестабильности контакта короткозамкнутых щеток настройку компенсации при малых значениях тока управления производить не рекомендуется.

При выборе диапазона настройки компенсации необходимо принимать во внимание влияние на компенсацию температуры машины, поскольку шунтирующее сопротивление и компенсационная обмотка находятся в разных условиях по нагреву.

16. ЗАВОДСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Электромашинные усилители — машины специальные, и на них не распространяются требования общесоюзного стандарта на испытания электрических машин ГОСТ 183—55. Программа и методика испытаний различных типов ЭМУ определяются специальными техническими условиями.

Как и для обычных машин, испытания ЭМУ разделяются на контрольные и типовые. Первым подвергаются все без исключения выпускаемые машины; вторые проводятся на заводе периодически,

обычно 1—2 раза в год на нескольких машинах или при таких изменениях конструкции и технологии, которые могут повлиять на параметры и надежность работы ЭМУ.

Перед проведением испытаний следует, как это указывалось выше, тщательно притереть и пришлифовать щетки к коллектору и произвести установку щеток относительно нейтрали. Во время испытаний необходимо следить за щеточным контактом. После каждой установки щеток или при подгорании их следует вновь пришлифовать к коллектору.

Во время испытаний необходимо следить за тем, чтобы скорость вращения якоря оставалась практически неизменной. Даже кратковременное изменение скорости вследствие гистерезиса может повлиять на изменение результатов испытаний. Рекомендуется в качестве привода применять асинхронный двигатель, у которого при неизменных напряжении и частоте питающей сети изменение скорости вращения невелико, и его можно не учитывать.

Все испытания обычно проводятся при питании одной из обмоток управления от независимого источника постоянного тока, а затем в конце контрольных испытаний проверяются остальные обмотки.

Примерная программа и методика заводских испытаний следующая:

а) Внешний осмотр, проверка соответствия чертежам и правильности маркировки выводных концов.

б) Проверка сопротивления обмоток. Предварительно обмотки отсоединяются, а щетки поднимаются. Замер сопротивления рекомендуется производить измерительными мостами: низкоомные обмотки (якоря, компенсационную, дополнительных полюсов, поперечную) — двойным измерительным мостом Томпсона, высокоомные (обмотки управления) — измерительным мостом Витстона.

в) Определение полного сопротивления переменному току для проверки обмоток ЭМУ на витковое замыкание. Каждая обмотка подключается к источнику переменного тока (обычно промышленной частоты) и измеряются ток, напряжение и мощность. При испытаниях все щетки должны быть подняты с коллектора, а шунтирующее сопротивление отключено. Наличие короткозамкнутых витков определяется более низким, чем обычно, полным сопротивлением и более высокой потребляемой мощностью. Путем медленного проворачивания якоря от руки можно установить место виткового замыкания; если полное сопротивление при проворачивании остается постоянным, это значит, что имеется витковое замыкание в статоре, если оно меняется в широких пределах — замыкание в якоре.

Одновременно с проверкой полного сопротивления какой-либо обмотки измеряется напряжение на остальных обмотках, что позволяет методом трансформации определить соответствие действительного числа витков расчетному. Индуктированная э. д. с. в обмотках, расположенных на другой оси, будет равна нулю.

Проверка полного сопротивления переменному току будет эффективна только при отсутствии массивных частей магнитопровода, как это обычно имеет место в ЭМУ. В противном случае в массивном магнитопроводе будут наводиться вихревые токи, искажающие результаты измерения.

г) Проверка направления вращения и полярности всех обмоток. Направление вращения обычно указывается стрелкой на корпусе

машины. В отечественных сериях ЭМУ направление вращения принято по часовой стрелке, если смотреть со стороны коллектора ЭМУ.

Правильность включения различных обмоток ЭМУ поперечного поля можно проверить, если под нагрузкой, близкой к номинальной, попеременно накоротко замыкать обмотки компенсационную, дополнительных полюсов и поперечную. Если при этом напряжение на выходе ЭМУ будет падать, обмотки включены правильно, а если возрастать, то, следовательно, концы той или иной обмотки перевернуты.

д) Проверка компенсации производится методами, указанными в предыдущем параграфе.

е) Проведение номинального режима, проверка номинальных данных и коммутации, определение перегревов. Испытания в номинальном режиме проводятся при номинальном напряжении на выходе ЭМУ и номинальной нагрузке. Во время контрольных испытаний номинальный режим проводится обычно в течение одного часа. В конце режима проверяется величина тока управления каждой обмотки управления при номинальном напряжении и величина тока нагрузки.

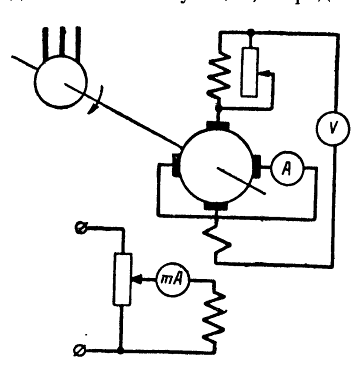


Рис. 42. Принципиальная схема снятия характеристики холостого хода ЭМУ поперечного поля.

Величина тока управления каждой обмотки не должна превышать расчетную.

В конце режима визуально оценивается степень коммутации по шкале ГОСТ-183-55. При номинальном режиме искрение под щетками должно быть, как правило, не выше степени $1^1/_2$.

При типовых испытаниях такая проверка проводится до установившейся температуры. Определение перегревов производится по методике ГОСТ-183-55, обмоток — методом сопротивления, коллектора, корпуса и подшипников — методом термометра.

Общепромышленная серия ЭМУ спроектирована с изоляцией класса Е, допускающей нагрев обмоток до 120° С.

ж) Снятие характеристики холостого хода и проверка величины остаточного напряжения. Снятие суммарной характеристики холостого хода производится по схеме рис. 42. В поперечную цепь включается амперметр. При изменении тока управления фиксируются ток в поперечной цепи и напряжение на выходе ЭМУ. Характеристика холостого хода снимается обычно до потолочного напряжения (примерно на 30% выше номинального). При контрольных испытаниях снимаются восходящая и нисходящая ветви кривой холостого хода в первом квадранте. После снятия характеристики проверяется величина остаточного напряжения. Если машина снабжена специальной размагничивающей обмоткой, то характеристика холостого хода и остаточное напряжение снимаются при ее включении.

Величины тока управления при номинальном напряжении холостого хода и остаточного напряжения обычно оговариваются

в технических условиях на ЭМУ. По току управления на холостом ходу можно ориентировочно судить о правильности установки щеток относительно нейтрали. Остаточное напряжение оказывает вредное влияние на работу систем автоматического регулирования, особенно следящих систем.

3) Снятие внешних характеристик. Внешняя характеристика снимается при неизменном значении номинального тока управления. Под номинальным обычно понимают ток управления при номинальных значениях напряжения и нагрузки ЭМУ. При снятии характеристики ток нагрузки изменяется от нуля до двукратного значения номинального. В ряде случаев требуется снятие при различных значениях тока управления.

Наклон внешней характеристики часто оговаривается в технических условиях.

и) Проверка на перегрузку по току. Поскольку ЭМУ работают в режимах частых кратковременных перегрузок, то в технических условиях оговариваются допустимые перегрузки по току при номинальном напряжении. Общепромышленная серия ЭМУ допускает двукратную перегрузку по току в течение 3 *сек*. Степень коммутации во время кратковременных перегрузок по току обычно не оговаривается, однако после этих испытаний на коллекторе не должно быть подгаров, которые нельзя было бы легко удалить марлей, смоченной спиртом или чистым авиационным бензином.

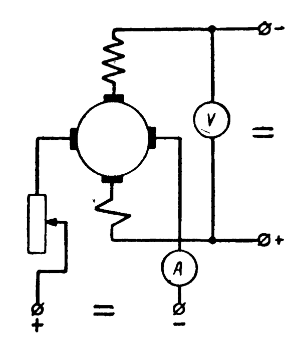


Рис. 43. Принципиальная схема испытания ЭМУ поперечного поля на повышенную скорость вращения.

При кратковременных перегрузках обмотки в основном якоре подвергаются тепловым и динамическим ударам, витковая изоляция при этом может повредиться. Поэтому очень важно, чтобы обмотка якоря была хорошо сцементирована пропиткой.

к) Испытание на повышенную скорость вращения. Проводится в нагретом состоянии после номинального режима. Цель испытания проверить механическую прочность якоря. При дефектах конструкции и технологического процесса изготовления ЭМУ при повышенной скорости вращения возможны витковые замыкания в якоре, распушение коллектора и лобовых частей обмотки, поломки вентилятора и пр.

Для ЭМУ общепромышленного исполнения установлено, что он должен выдержать без вредных деформаций превышение оборотов на 20% в течение 5 *мин*. После этого испытания рекомендуется измерить биение коллектора.

Если приводом ЭМУ является двигатель постоянного тока, то скорость можно увеличить, повышая напряжение на его якоре или ослабляя поток возбуждения.

Если привод осуществляется от асинхронного двигателя и нет источника повышенной частоты, испытание на повышенную скорость можно произвести при работе ЭМУ в двигательном режиме (рис. 43). К продольным щеткам подводится номинальное напряжение от постороннего источника постоянного тока, к поперечным

щеткам также подводится напряжение постоянного тока. Регулируя ток через поперечные щетки, можно получить необходимую скорость. Обмотки управления при этом опыте выключаются.

л) Проверка сопротивления изоляции. Производится как в холодном, так и в горячем состоянии мегомметром на 500 *в*. Величина сопротивления изоляции должна удовлетворять требованиям ГОСТ 183-55 или технических условий.

м) Испытание электрической прочности изоляции обмоток от корпуса и между обмотками. Данное испытание производится в конце контрольных испытаний, после проверки сопротивления изоляции в нагретом состоянии. Испытанию на электрическую прочность подвергают поочередно каждую электрическую цепь. Методика проведения испытаний и нормы испытательных напряжений установлены ГОСТ 183-55.

н) Определение к. п. д. ЭМУ в номинальном режиме. Производится при типовых испытаниях. Наиболее часто при определении к. п. д. используется метод тарированного двигателя. Определение к. п. д. производится при установившейся температуре ЭМУ (нагретом состоянии).

ЭМУ приводится во вращение тарированным двигателем постоянного тока или асинхронным двигателем, потери и к. п. д. которого предварительно определены известными способами (ГОСТ 183-55).

По потребляемой из сети мощности тарированного двигателя и известным потерям определяют механическую мощность, подводимую к ЭМУ при различных режимах его работы;

1) с разомкнутой поперечной и продольной цепью:

2) с замкнутой поперечной обмоткой при номинальном токе управления и поперечной цепи.

В первом случае при номинальной скорости вращения определяются механические потери ЭМУ $P_{мех}$, во втором случае — потери в стали $P_{ст}$.

Определение потерь в обмотках $P_{м}$, в щеточном контакте $P_{щ}$ и добавочных $P_{доб}$ обычно производится путем расчета по номинальному току. При этом потери в меди будут:

$$P_{м} = (I_{2н}^2 + I_{3н}^2) R_a + I_{3н}^2 R_{д} + I_{3н}^2 \times \frac{R_{ш} R_{к}}{R_{к} + R_{ш}} + I_{2н}^2 R_{п} + I_{1н}^2 R_{у}, \quad (89)$$

где $I_{1н}$, $I_{2н}$, $I_{3н}$ — номинальные токи управления, поперечной и продольной цепей;

R_a, $R_{д}$, $R_{к}$, $R_{ш}$, $R_{п}$, $R_{у}$ — соответственно сопротивления якоря, обмотки дополнительных полюсов, компенсационной обмотки, шунтирующего сопротивления, поперечной подмагничивающей обмотки, обмотки управления, приведенные к температуре 75° С.

Потери в щеточном контакте

$$P_{щ} = 2\Delta U_{щ} (I_{2н} + I_{3н}), \quad (90)$$

где $2\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в щеточном контакте.

Для электрографитированных щеток $2\Delta U_{щ} = 2\,в$.

Добавочные потери, так же как и в обычных машинах, в ЭМУ принимают 1% от полезной мощности.

Общие потери в ЭМУ, как и во всякой машине постоянного тока, будут:

$$\Sigma P = P_{мех} + P_{ст} + P_{м} + P_{щ} + P_{доб}. \quad (91$$

По ним легко определить к. п. д.

о) Определение уровня радиопомех. Производится при типовых испытаниях. Источником помех радиоприему в ЭМУ является щеточный контакт. При коммутации в нем возникают высокочастотные колебания, энергия которых может излучаться как через выводные концы машины, так и виде электромагнитного поля, образующегося вокруг источника помех. Уровень помех определяется главным образом качеством коммутации, кроме того, он зависит от емкости обмоток по отношению к земле и их индуктивности при частотах радиоприема.

Для подавления радиопомех на выводе ЭМУ включается емкостный фильтр.

Измерение уровня радиопомех производится приборами типов ИП-14, ИМ-18, ИП-25, представляющими собой высокочастотные электронные микровольтметры.

Допустимые уровни радиопомех и методика их определения устанавливаются «Нормами предельно допустимых индустриальных радиопомех», разработанными Государственной радиоинспекцией при Министерстве связи СССР.

В зависимости от условий применения ЭМУ, кроме указанных выше, в программу типовых испытаний включаются также испытания при различных условиях окружающей среды (жара, холод, повышенная влажность, пониженное давление, дождь и пр.), при различных механических нагрузках (вибрация, удар и др.). Требования и методика проведения таких испытаний для каждого типа ЭМУ указываются в технических условиях.

При проектировании систем автоматического регулирования и выбора к ним ЭМУ следует иметь в виду, что ЭМУ поперечного поля чувствительны к изменению температурных условий окружающей среды (несколько изменяется переходное сопротивление щеточного контакта и настройка компенсации).

17. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для расчета систем автоматического регулирования часто требуется знание постоянных времени ЭМУ.

Экспериментально постоянные времени можно определить осциллографированием индуктированной э. д. с.

Для определения постоянной времени цепи управления можно снять осциллограмму э. д. с., индуктируемой на разомкнутых поперечных щетках при внезапном включении постоянного напряжения на обмотку управления.

Таким же методом можно определить постоянную времени поперечной цепи; для этого осциллографируется э. д. с., индуктируемая на продольных щетках при внезапном включении номинального тока через поперечные щетки от постороннего источника постоянного тока.

Принципиальные схемы включения вибраторов осциллографа для определения постоянных времени показаны на рис. 44.

При отсутствии насыщения и малом влиянии вихревых токов нарастание напряжения при этих опытах будет происходить по экспоненте, из которой легко получить постоянную времени.

Время нарастания напряжения холостого хода можно определить, осциллографируя напряжение на выходе ЭМУ при включении напряжения на обмотку управления (рис. 44,*в*).

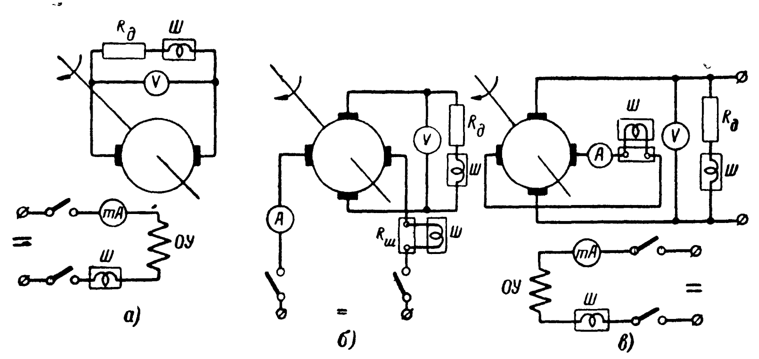


Рис. 44. Схемы определения постоянных времени ЭМУ поперечного поля. *а* — постоянная времени обмотки управления; *б* — постоянная времени обмотки якоря; *в* — время нарастания напряжения холостого хода; *Ш* — шлейфы осциллографа; $R_д$ — добавочные сопротивления к шлейфам осциллографа; $R_ш$ — шунт к шлейфу осциллографа.

Характер кривой нарастания напряжения будет зависеть не только от постоянных времени цепи управления и поперечной цепи, но, как уже отмечалось выше, в значительной степени также и от реакции тока поперечной цепи (сдвиг щеток с нейтрали, размагничивающее действие коммутационных токов и потерь в стали).

При определенном сдвиге щеток с нейтрали против направления вращения размагничивающее действие коммутационных токов и потерь в стали компенсируется н. с., созданной за счет сдвига щеток, и процесс нарастания напряжения холостого хода будет апериодическим. При установке щеток в нейтраль сказывается реакция тока поперечной цепи и процесс нарастания напряжения становится колебательным с быстро затухающими колебаниями. При дальнейшем сдвиге щеток с нейтрали по направлению вращения якоря реакция тока поперечной цепи будет увеличиваться, а вместе с этим будет более резко сказываться пик напряжения и увеличиваться быстродействие ЭМУ.

Экспериментально реакция тока поперечной цепи может быть определена с помощью флюксметра, подключенного к обмотке управления. При отсутствии потоков управления и питании якоря через поперечные щетки от постороннего источника постоянного тока (рис. 45,*а*) по продольной оси машины при вращении якоря будут действовать только потоки реакции тока поперечной цепи, сцепленные с обмоткой управления. В момент включения или выключения тока через поперечные щетки можно флюксметром измерить величину этих потоков.

Для того чтобы разделить влияние различных факторов на реакцию тока поперечной цепи, необходимо щетки установить точно в нейтраль, причем установку щеток в нейтраль можно также проверить по схеме рис. 45,*а* с помощью флюксметра. При неподвижном якоре и щетках, установленных в нейтраль, стрелка флюксметра не должна отклоняться в момент включения или выключения тока, пропускаемого через поперечные щетки. Затем при вращающемся якоре и щетках, установленных в нейтраль, можно определить флюксметром величину н. с. коммутационных токов и потери в стали.

Для разделения действия этих намагничивающих сил можно воспользоваться поперечной подмагничивающей обмоткой. Питая ее отдельно при поднятых поперечных щетках от постороннего

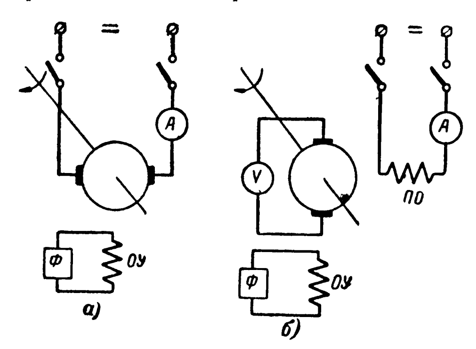


Рис. 45. Схемы определения реакции тока короткозамкнутой цепи.

а — суммарная реакция коммутационных токов и потерь в стали; *б* — потери в стали; *Ф* — флюксметр.

источника постоянного тока (рис. 45,*б*), можно с достаточной точностью имитировать поперечное поле машины. При этом величина тока через поперечную обмотку должна быть такой, чтобы на продольных щетках создавалось номинальное напряжение ЭМУ. В этом случае по продольной оси машины будет действовать только н. с. потерь в стали, которую можно измерить с помощью флюксметра в момент включения и выключения тока в поперечной обмотке. Вычитая эту н. с. из суммарной н. с. реакции тока поперечной цепи, полученной из предыдущего опыта, получим н. с. коммутационных токов. Экспериментальное исследование, произведенное на машинах ЭМУ-12, ЭМУ-25, ЭМУ-50, показало, что н. с. коммутационных токов составляет примерно $^2/_3$, а н. с. потерь в стали $^1/_3$ от суммарной н. с.

Измерение н. с. реакции тока поперечной цепи флюксметром удобно производить в относительных единицах к номинальной н. с. управления, предварительно измерив флюксметром величину н. с. потока управления при номинальном токе управления.

Зная реакцию тока поперечной цепи C_f и постоянные времени цепей управления T_1 и поперечной T_2, можно рассчитать передаточную функцию ЭМУ по уравнению (83).

Тип	Усилитель											
	Номинальные данные (на выходе) обмотки управления											
	Напряжение, *в*	Мощность, *квт*	Ток, *а*	Число оборотов в минуту	Ток, к. з. цепи, *а*	Число обмоток	Выходная мощность обмотки при			Отношение длительно допустимого тока к номинальному при		
							II обмотках, *вт*	III обмотках, *вт*	IV обмотках, *вт*	II обмотках	III обмотках	IV обмотках
ЭМУ12-А	60	1,0	16,7	2 900	67	2—4	0,45	0,7	0,9	9	7	5
	115	1,2	10,4		4,2							
ЭМУ12-П	60	1,0	16,7	2 850	6,7	2—4	0,45	0,7	0,9	9	7	5
	115	1,0	8,7		4							
	115	1,2	10,4		4,2							
	115	1,5	13,0	4 000	5,2							
ЭМУ25	115	1,2	10,4	1 440	3,2	2—4	0,5	0,75	0,9	9	7	5
	230	1,2	5,2		1,6							
	115	2,5	21,7	2 925	6,5							
	230	2,5	10,9		3,3							
ЭМУ50	115	2,2	19,1	1 440	5,7	2—4	0,5	0,75	0,9	9	7	5
	230	2,2	9,6		2,9							
	230	4,5	19,6	2 935	5,9							
ЭМУ70	115	3,5	30,4	1 450	7,6	2—4	0,5	0,75	0,9	9	7	5
	230	3,5	15,2		3,8							
	230	7,0	30,4	2 900	7,6							
ЭМУ100	115	5,0	43,5	1 450	10,9	2—4	0,5	0,75	0,9	9	7	5
	230	5,0	21,7		5,4							
	230	10	43,5	2 900	10,9							
ЭМУ-110	230	11	47,8	1 450	9,6	2—4	0,5	0,75	0,9	9	7	5

МАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ (примечания см. стр. 118)

Номинальные данные встроенного приводного двигателя							К. п. д. агрегата, %
Род тока	Напряжение, *в*	Схема соединения обмоток статора	Потребляемая мощность *квт*	Ток, *а*	Cos φ	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$ трехфазного двигателя	
Трехфазный	127/220 220/380	Δ/*Y*	1,65	9,2/5,3 5,3/3,1	0,82	6,7	60
	127/220 220/380		1,9	10,5/6 6/3,5	0,83	6	63
Постоянный	110		1,7	15,5			59
	220			7,7			
	110			15,5			
	220			7,7			
	110		2,05	18,6			60
	110		2,4	21,8			62
							68
							74
							78 80
							78 80
							81 84
							82

Тип	№ комплекта обмоток управления	Число обмоток управления	Основные данные обмоток: I обмотка: Число витков в обмотке	I обмотка: Омическое сопротивление обмотки при 20° C, *ом*	I обмотка: Номинальный ток управления, *ма*	I обмотка: Длительно допустимый ток, *ма*	II обмотка: Число витков в обмотке	II обмотка: Омическое сопротивление обмотки при 20° C, *ом*
ЭМУ12-А и ЭМУ12-П	12-2-А	2	2 900	1 030	22	190	2 900	1 030
	12-2-Б	2	4 600	2 200	14	130	4 600	2 200
	12-2-В	2	4 800	2 600	13	117	4 800	2 600
	12-3-Г	3	3 000	1 550	21	145	3 000	1 550
	12-3-Д	3	2 350	1 340	27	135	2 350	1 340
	12-3-Е	3	500	161	130	200	370	84
	12-3-Ж	3	900	155	70	350	900	155
	12-4-З	4	675	184	94	240	900	155
ЭМУ25	25-2-А	2	3 400	985	22	200	3 400	985
	25-2-Б	2	4 360	1 500	17	155	4 360	1 500
	25-2-В	2	6 600	3 310	11,5	105	6 600	3 310
	25-2-Г	2	8 000	5 000	9,5	85	8 000	5 000
	25-3-Д	3	2 600	1 065	28,5	150	2 600	1 065
	25-4-Е	4	500	37,2	145	720	330	18,5
	25-4-Ж	4	1 300	340	56	225	330	18,5
	25-4-З	4	3 200	1 820	23	115	330	18,5
ЭМУ25	25-4-И	4	400	21,7	180	950	2 800	1 500
	25-4-К	4	5 000	2 920	14,5	85	500	131
	25-4-Л	4	1 300	340	56	225	330	18,5
	25-4-М	4	3 600	1 835	20	100	3 600	2 165
	25-4-Н	4	18	0,04	4000	20 000	500	44,1

УПРАВЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ

Основные данные обмоток											
II обмотка		III обмотка				IV обмотка					
Минимальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*	Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*	Номинальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*	Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*	Номинальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*		
22	190	—	—	—	—	—	—	—	—		
14	130	—	—	—	—	—	—	—	—		
13	117	—	—	—	—	—	—	—	—		
21	145	3 000	1 345	21	145	—	—	—	—		
27	135	460	34,2	140	820	—	—	—	—		
170	280	740	72	85	600	—	—	—	—		
70	350	1 350	367	47	240	—	—	—	—		
70	350	675	184	94	240	900	155	70	350		
22	200	—	—	—	—	—	—	—	—		
17	155	—	—	—	—	—	—	—	—		
11,5	105	—	—	—	—	—	—	—	—		
9,5	85	—	—	—	—	—	—	—	—		
28,5	150	2 600	950	28,5	200	—	—	—	—		
220	1 100	330	15,6	220	1 100	330	18,5	220	1 100		
220	1 100	1 300	340	56	225	1 300	402	56	225		
220	1 100	3 200	1 820	23	115	1 200	792	61	120		
26	120	400	21,7	180	950	2 800	1 600	26	120		
145	500	5 000	2 920	14,5	85	1 500	1 000	19	115		
220	1 100	330	15,6	220	1 100	330	18,5	220	1 100		
20	100	3 600	1 835	20	100	3 600	2 165	20	100		
145	720	18	0,04	4 000	20 000	500	44,1	145	720		

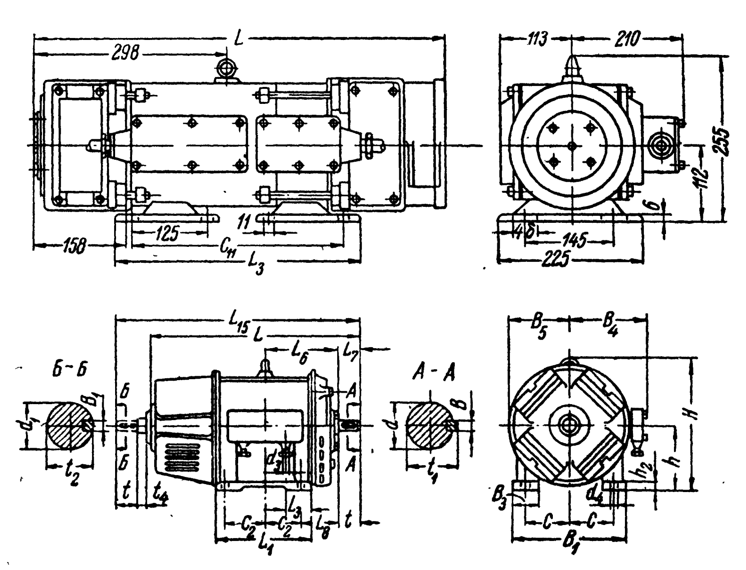
Тип	№ комплекта обмоток управления	Число обмоток управления	Основные данные обмоток					
			I обмотка				II обмотка	
			Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*	Номинальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*	Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*
ЭМУ50	50 2-А	2	3 420	1 000	22	200	3 420	1 000
	50-2-Б	2	3 720	1 500	19,5	175	3 720	1 500
	50-2-В	2	6 600	3 920	11,5	105	6 600	3 920
	50-4-Г	4	380	24,8	190	950	220	9,15
	50-4-Д	4	3 200	2 200	23	115	220	9,15
	50-4Е	4	5 000	3 540	14,5	85	5 000	3 540
	50-4-Ж	4	2 800	1 540	26	120	2 800	1 770
	50-4-З	4	1 710	465	44	220	1 710	535
	50-4-И	4	2 750	1 500	27	120	2 300	1 000
	50-4-К	4	2 750	1 500	27	120	1 260	300
	50-4-Л	4	1 300	410	56	225	330	21,6
	50-4-М	4	380	24,8	190	950	15	0,04
ЭМУ70	70-2-А	2	3 600	1 000	22	200	3 600	1 000
	70-2-Б	2	4 000	1 500	20	180	4 000	1 500
	70-4-В	4	3 600	1 950	22	120	2 000	800
ЭМУ100	100-2-А	2	3 200	1 000	23	210	3 200	1 000
	100-4-Б	4	230	8,16	320	1 600	460	37,2
	100-4-В	4	230	8,16	320	1 600	3 000	2 100
	100-4-Г	4	230	8,16	320	1 600	460	37,2
ЭМУ110	110-4-А	4	230	4,9	400	2 000	460	22,4
	110-4-Б	4	1 700	317	54	270	1 700	362
	110-4-В	4	230	4,9	400	2 000	230	5,6

Примечания:
1. Допуск на сопротивление +15%.
2. Допуск на номинальный ток управления +10%.

Основные данные обмоток									
II обмотка		III обмотка				IV обмотка			
Минимальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*	Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*	Номинальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*	Число витков в обмотке	Омическое сопротивление обмотки при 20° С, *ом*	Номинальный ток управления, *ма*	Длительно допустимый ток, *ма*
22	200	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	175	—	—	—	—	—	—	—	—
11,5	105	—	—	—	—	—	—	—	—
330	1 650	220	7,95	330	1 650	220	9,15	330	1 650
330	1 650	3 200	2 200	23	115	1 200	930	61	120
14,5	85	100	4,16	730	2 000	500	44,7	145	720
26	120	2 800	1 540	26	120	2 800	1 770	26	120
44	220	1 710	465	44	220	1 710	535	44	220
32	160	2 750	1 500	27	120	2 300	1 000	32	160
58	290	2 750	1 500	27	120	400	30	180	900
220	1 100	1 300	410	56	225	1 300	470	56	225
4 800	24 000	15	0,04	4 800	24 000	15	0,04	4 800	24 000
22	200	—	—	—	—	—	—	—	—
20	180	—	—	—	—	—	—	—	—
40	180	3 600	1 950	22	120	330	24	240	960
23	210	—	—	—	—	—	—	—	—
160	800	230	8,16	320	1 600	460	37,2	160	800
25	120	230	8,16	320	1 600	3 000	2 100	25	120
160	800	460	32,6	160	800	460	37,2	160	800
200	1 000	460	19,6	200	1 000	460	22,4	200	1 000
54	270	1 700	317	54	270	1 700	362	54	270
400	2 000	230	4,9	400	2 000	460	22,4	200	1 000

ГАБАРИТНЫЕ РАЗМЕРЫ

Тип	Размеры, *мм*														
	B_1	B_3	B_4	B_5	b	b_1	C_2	C_{11}	C	d_1	d	d_4	d_8	H	R
ЭМУ12-А	—	—	—	—	—	—	—	345	—	—	—	—	—	—	—
ЭМУ12-П	—	—	—	—	—	—	—	324	—	—	—	—	—	—	—
ЭМУ25	290	70	250	150	8	$\frac{—}{8}$	115	—	125	$\frac{—}{25}$	25	15	26	341	1
ЭМУ50	290	70	250	150	8	$\frac{—}{8}$	115	—	125	$\frac{—}{25}$	25	15	26	341	1
ЭМУ70	360	80	290	187	10	$\frac{—}{8}$	125	—	155	$\frac{—}{30}$	35	19	26	422	1
ЭМУ100	360	80	290	187	10	$\frac{—}{8}$	125	—	155	$\frac{—}{30}$	35	19	26	422	1
ЭМУ110	450	90	322	220	14	$\frac{—}{14}$	160	—	190	$\frac{—}{45}$	45	28	30	525	1



Эскизы электромашинных усилителей.

ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Тип	Размеры, *мм*													
	h	h_2	L	L_1	L_3	L_6	L_7	L_8	L_{15}	l	l_4	t_1	t_2	Вес, *кг*
ЭМУ12-А	—	—	605	—	385	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭМУ12-П	—	—	635	—	365	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭМУ25	150	25	515/—	276	70	193	64	82	—/586	60	—/2	28	—/28	100
ЭМУ50	150	25	589/—	276	70	229	66	120	—/600	60	—/2	28	—/28	125
ЭМУ70	190	25	654/—	300	80	238	82	115	—/750	80	—/6	38,5	—/33	195/197
ЭМУ100	190	25	714/—	300	80	268	82	145	—/810	80	—/6	38,5	—/33	225/227
ЭМУ110	225	30	926/—	390	90	350	114	194	—/1 035	110	—/6	49	—/49	380/382

Примечания (к приложению 1 „Технические данные"): 1. Номинальный ток управления равен

$$\sqrt{\frac{\textit{выходная мощность} + 20\%}{\textit{сопротивление обмотки управления} + 15\%}} + 10\%.$$

2. ЭМУ сопрягается с приводом при помощи эластичной муфты.
3. На осевую нагрузку подшипники ЭМУ не рассчитаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяинов Ф. А., Электромашинные усилители, Госэнергоиздат, 1962.

2. Сей М., Электромашинные усилители, Госэнергоиздат, 1959.

3. Рудаков В. В., Электромашинные усилители в системах автоматики, Госэнергоиздат, 1961.

4. Бергер А. Я., Электромашинные усилители ЭМУ, ЦБТИ НИИ Электропромышленности, 1959.

5. Хмелевский В. С., Наладка электропривода, Госэнергоиздат, 1958.

6. Фейгин В. И., Электромашинные усилители в прокатных цехах, Металлургиздат, 1954.

7. Белоновский А. С., Менский Б. М., Автоматизированный привод с электромашинным усилителем, Воениздат, 1956.

8. Блажкин А. Т., Электромашинное автоматическое управление электроприводами, Металлургиздат, 1954.

9. Радин В. И., Реакция коммутационных токов ЭМУ поперечного поля, «Электричество», 1957, № 9.

10. Радин В. И., ЭМУ с укороченным шагом, «Электричество», 1959 № 4.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. Основные понятия и требования 3

Глава первая. **ЭМУ продольного поля** 6

1. Независимый ЭМУ 6
2. ЭМУ с самовозбуждением 9
3. Двухмашинные усилители 11
4. Двухколлекторные усилители 13
5. Двух- и трехступенчатые ЭМУ продольного поля 16

Глава вторая. **ЭМУ поперечного поля** 18

6. Принцип действия и конструкция 18
7. Статические характеристики и коэффициент усиления . . 26
8. Быстродействие и переходные процессы 34
9. ЭМУ с полудиаметральным шагом обмотки якоря 38

Глава третья. **Применение ЭМУ** 44

10. ЭМУ как элемент системы автоматического регулирования 44
11. Автоматическое регулирование напряжения генератора 48
12. Регулирование скорости двигателя 53
13. ЭМУ в следящем приводе 57

Глава четвертая. **Настройка и испытания ЭМУ** . . . 59

14. Щеточный контакт 59
15. Настройка компенсации 61
16. Заводские испытания 62
17. Специальные испытания 67

Приложения 70

Литература 78

„БИБЛИОТЕКА ПО АВТОМАТИКЕ“

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ В 1962 г.

Выпуск 48. Зильберман Б. З., Моделирование электроприводов

Выпуск 49. Гринштейн М. М., Фотосопротивления в приборах промышленной автоматики

Выпуск 50. Монахов В. И., Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара

Выпуск 51. Вильгельм Мерл, Электрический контакт

Выпуск 52. Дмитриев В. Н., Чернышев В. И., Пневматические вычислительные приборы непрерывного действия

Выпуск 53. Шадрин В. Н., Магнитная запись в автоматике

ГОТОВЯТСЯ К ПЕЧАТИ:

Куницкий Н. П., Управление реверсивными прокатными станами с ионным возбуждением

Хилтон А. М., Логика и цепи переключений

Заволокин А. К., Последовательные преобразователи непрерывных величин в числовые эквиваленты

Богачев А. М. и Лямбах Р. В., Приборы автоматического контроля размеров проката.

Цена 25 коп.